

اختيار المواد الهندسية

أ.د قحطان خلف الخزرجي

د. عباس خماس الساعدي

دار دجلة ناشرون وموزعون

www.dardjlah.com

الجامعة التكنولوجية
تأسست سنة ١٩٧٥م



إختيار المواد الهندسية

إختيار المواد الهندسية

المؤلف

أ.د.قحطان خلف الخزرجي

د.عباس خماس الساعدي

2011

دار دجلة



المحتويات



مقدمة

Introduction

الحمد لله ربّ العالمين و الصلاة و السلام على سيد العلماء و سيد الأولين والآخرين رسول ربّ العالمين و على آله و صحبة المنتجبين. أما بعد، فإن العدد الكبير من المواد الهندسية ربما يعقد من مهمة إختيار المادة الهندسية المناسبة للتطبيق المعين، وعليه، مهمة إختيار المواد الهندسية تعتبر مهمة شاقة لأنها تتطلب تحقيق متطلبات التصنيع Fabrication Requirements، متطلبات الخدمة أو التطبيق Service Requirements، و المتطلبات الإقتصادية Economic Requirements. وهذا بدوره يتطلب المعرفة الشاملة بالعلاقات مابين التركيب (البنية) Structure - الخاصية Property- طريقة التصنيع (أو المعالجة) Processing - التركيب الكيمياوي Composition للمواد الهندسية. من هنا، إختيار المادة الهندسية لا يمكن أن يتم بمعزل عن إختيار العملية أو الطريقة التي بواسطتها يمكن (سباكة Casting، تشكيل Forming، لحام Welding...الخ) المادة الهندسية. أضف الى ذلك، أن عامل الكلفة Cost يعتبر من العوامل الأساسية في كل من عملية إختيار المادة و الإسلوب الذي تصنّع فيه تلك المادة.

يتناول هذا الكتاب موضوع "إختيار المواد الهندسية" بإسلوب مبسط حيث يتكون من خمسة فصول. يتناول الفصل الأول، مقدمة موجزة حول مهمة إختيار المادة الهندسية، بينما يتناول الفصل الثاني، إختيار المادة الهندسية إعتماداً على الخواص، أما الفصل الثالث، فإنه يتناول إختيار العملية أو طريقة التصنيع المستخدمة في تصنيع أو معالجة المادة الهندسية. بعد ذلك، تناول الفصل الرابع، المعايير المستخدمة في عملية إختيار المواد الهندسية. في الفصل الخامس، تم دراسة بعض الحالات التطبيقية التي تبين كيفية إختيار المادة الهندسية بالإعتماد على معايير عملية الإختيار. يلي ذلك، ملحق مبسط يتضمن المخططات التي

تستخدم بشكل شائع في عملية إختيار المواد الهندسية أي Materials Selection Charts. و أخيراً، أتمنى أن أكون قد وفقت في إغناء المكتبة العربية و ما التوفيق إلا من عند الله و الحمد لله ربّ العالمين.

أ. د. قحطان خلف الخزرجي

د. عباس خماس الساعدي

الفصل الأول
مقدمة حول إختيار المواد الهندسية
Introduction to Eng. Materials Selection

الفصل الأول
مقدمة حول إختيار المواد الهندسية
Introduction to Eng. Materials Selection

1.1 مقدمة Introduction

إن من أهم المتطلبات الأساسية للحصول على المنتج المقبول و بكلفة تنافسية Competitive هو إختيار المادة المثلى Optimum Material من مجموعة المواد الهندسية المتوفرة. إن هذه المهمة ليست بالسهلة، فهناك نسبة كبيرة من فشل المنتجات الذي يحدث نتيجة الإختيار الخاطئ للمواد. ومما يزيد من تعقيد مهمة الإختيار، هو أن العملية المستخدمة في تصنيع المنتج تؤثر على خواص المواد وسلوكها في التطبيق. وعليه، مهمة إختيار المواد يجب أن لاتتم بمعزل عن طرق التصنيع Manufacturing Processes، التي بدورها يجب أن لاتتم بمعزل عن تصميم المنتج Product Design. أضف الى ذلك، أن فعالية إختيار المواد وعملية التصنيع يجب أن لا تقتصر على المظاهر التقنية Technical Aspects فحسب، وإنما على المظاهر الإقتصادية Economic Aspects أيضاً،لأن المتطلب الأساسي للمنتج الناجح هو الجدوى الإقتصادية Economic Feasibility.

إن دور مهندس المواد Materials Engineer في فريق التصميم Design Team، يبرز من خلال هندسة المواد Materials Engineering التي تمثل حلقة

الوصل مابين فروع الهندسة الأخرى، لأن فريق التصميم يتكون عادة من مجموعة من الأعضاء من فروع الهندسة الأخرى مثل:

1. Mechanical Engineering. الهندسة الميكانيكية

2. Civil Engineering. الهندسة المدنية

3. Engineering Environmental . هندسة البيئة

4. Chemical Engineering. الهندسة الكيمياوية

5. Electrical Engineering. الهندسة الكهربائية

6. Aerospace Engineering. هندسة الطائرات

7. Nuclear Engineering. الهندسة النووية

8. Architectural Engineering. الهندسة المعمارية

9. Textile Engineering**.** هندسة النسيج

فإذا عرّفنا التصميم الهندسي Engineering Design بأنه عملية الحصول على جزء أو نظام جديد، فإن دور مهندس المواد يكمن في السؤال التالي: من أي مادة سوف يصنّع ذلك الجزء أو النظام؟ وللوصول الى الإجابة حول هذا السؤال، فإن سلسلة من الأسئلة يجب الإجابة عليها أولاً على سبيل المثال:

1. ما هي متطلبات الأداء Performance Requirements (الكهربائية، الميكانيكية، الكيمياوية، الحرارية) لذلك الجزء أو النظام؟

2. كيف سيتم إنتاج ذلك الجزء؟

3. ماهي الفترة الزمنية المطلوبة لذلك الجزء أو النظام في الخدمة أو التطبيق؟

4. ماهو المستوى المقبول من كلفة الإنتاج؟

5. ما هي عمليات الفحص Inspection المطلوبة لذلك الجزء أو النظام؟

؟Maintenance أو الصيانة 6Repair. كم سيتطلب من عملية الإصلاح

7. ما هي الفترة الزمنية التي سوف يستهلك عندها خلال التطبيق؟

؟8In-Service Failure. ما هي نتائج الفشل أثناء التطبيق أو الخدمة

وعليه، مهندسي المواد يتعاملون بشكل مباشر مع:

.1Product Durability. قابلية تحمل المنتج

2. الكلفة Cost.

3. المعولية Reliability.

4. المسؤلية القانونية Liability.

5. علاقة الوسط مع المادة Correlation Between Environment and Material.

6. إختيار العملية أو طريقة التصنيع Process Selection.

2 .1 العوامل المؤثرة على إختيار المادة

Factors Affecting Material Selection

تتأثر مهمة إختيار المواد بالعديد من العوامل وهذه العوامل تتضمن:

إعتبارات التصميم Design Considerations.

الخواص الميكانيكية Mechanical Properties.

كلفة الجزء Component Cost.

متطلبات التطبيق Service Requirements.

المتطلبات الوظيفية Functional Requirements.

خواص المادة Material Properties.

تراكيب (بنية) المادة Material Structures.

الإنتفاع أو الإستفادة من المادة Material Utilization.

في المقاطع التالية، نتطرق الى شرح هذه العوامل بشيء من التفصيل.

1.2.1. إعتبارات التصميم **Design Considerations**

خلال مرحلة تصميم الجزء، يجب أن يقرر المهندس ماهي ماهي المادة أو المواد التي سوف تكون أكثر ملائمة.وفي بعض الحالات، متطلبات التطبيق للجزء هي التي تحدّد المواد التي يجب إستخدامها. على سبيل المثال، كاوية اللحام Soldering Iron تتطلب إستخدام اللقمة النحاسية Copper-Bit لغرض توصيل الطاقة الحرارية من مصدر الحرارة الى وصلة اللحام، وفي هذه الحالة اللقمة البوليمرية Polymer-Bit سوف تكون غير مناسبة. وفي أغلب الحالات لاتكون مهمة إختيار المادة سهلة أو غير معقدة. إن الإختيار الخاطئ يمكن أن يؤدي الى فشل الجزء الذي ربما يؤدي الى نتائج فادحة. ومع هذا المدى الضخم من المواد الهندسية كيف يمكن لمهندسي التصميم أن يصنعوا قرارهم حول الإختيار النهائي Final Choice للمادة؟ إن القرار ليس بسيطاً، حيث عدة عوامل مهمة يجب أن تؤخذ بنظر الإعتبار وهذه تتضمن:

أ. حجم وشكل الجزء Size and Shape of Component.

ب. كلفة المادة Cost of Material.

ج. درجة توفر المادة Availability of Material.

د. عدد الأجزاء المطلوبة Number of Required Components.

هـ. الخواص الفيزيائية والميكانيكية Physical and Mechanical Properties.

و. الخلوص البعدي Dimensional Tolerance.

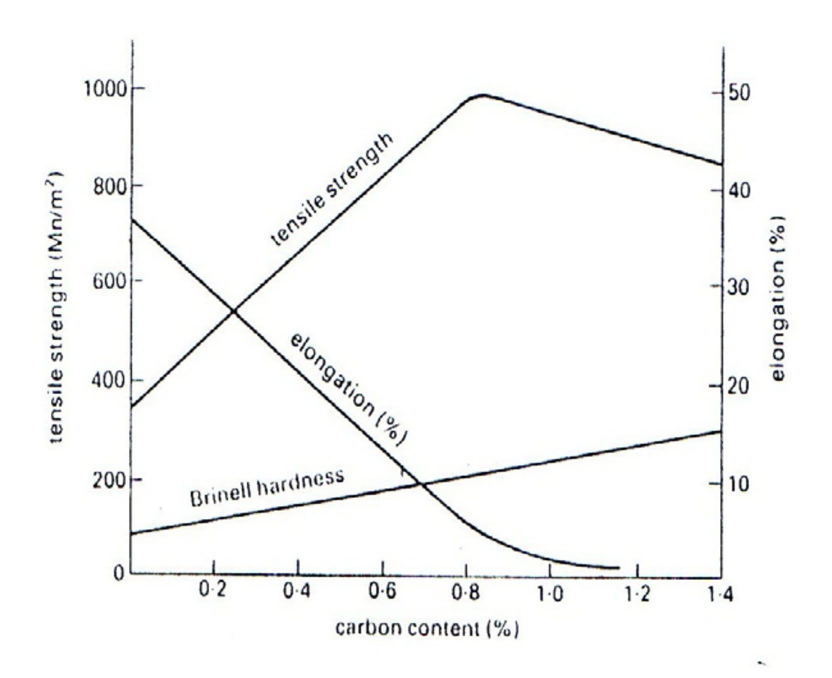
ز. درجة توفر عدة الإنتاج Availability of Production Plant.

إن العوامل المؤثرة على إختيار المادة لايمكن أن تؤخذ بنظر الإعتبار بشكل معزول، إن حجم و شكل الجزء سوف يؤثر على عمليات الإنتاج أي مسبوك Cast أم مشكّل Formed أم مشغّل Machined. و عند إختيار طريقة السباكة بالقوالب المعدنية Die-Casting للإنتاج، فإن هذه الطريقة سوف تحد من إختيار المادة حيث تجعله مقتصراًً على السبائك التي تتميز بدرجة إنصهار منخفضة مثل المغنيسيوم Mg، الخارصين Zn، الألمنيوم Al. و حتى تكون طريقة السباكة بالقوالب المعدنية إقتصادية، فإن عدد الأجزاء المطلوبة يجب أن يكون عالياً، و ذلك لمعادلة تكاليف الإنتاج العالي مع كلفة تصنيع القالب. إن درجة الإنهاء السطحي Surface Finish و الخلوص Tolerance بالنسبة للمنتج النهائي سوف تؤثر على طريقة الإنتاج، ولهذا تكون طريقة السباكة الرملية Sand Casting رديئة مقارنة مع طريقة السباكة بالقوالب المعدنية بواسطة الضغط Pressure Die-Casting من حيث الإنهاء السطحي و الدقة البعدية، و لكنها أقل كلفة. و هذه تمثل بعض النقاط المهمة التي يجب أن تؤخذ بنظر الإعتبار من قبل مهندس التصميم

2.2.1 الخواص الميكانيكية Mechanical Properties

إن الخواص الميكانيكية مثل المتانة Toughness، المقاومة Strength، الصلادة Hardness، يمكن أن تحدّد ملائمة بعض المواد الهندسية للإختيار. الشكل 11 يبين التغيرات في الخواص الميكانيكية لسبائك الحديد - كاربون مع تغيّر محتوى الكاربون. و هذا يزود المهندس بمدى واسع من سبائك الحديد-

كاربون لإختيار المناسب منها. و بعد إختيار السبيكة الملائمة على أساس محتوى الكاربون، هل أن ذلك سوف يكون دالة مقبولة في التطبيق؟ إن أحد متطلبات التصميم للعجلات المسنّنة (الترس) Gear Wheels الصغيرة، أن تكون صلدة و ذلك لضمان أدنى كمية ممكنة من البلى Wear و بالتالي حفظ الدقة.



الشكل 11.2

العلاقة مابين محتوى الكاربون و خواص سبائك الحديد-كاربون .

في البداية، يمكن إنتاج مثل هذه المسننات من الفولاذ الكاربوني المصلّد Hardened Carbon Steel، و لكن الآن، مواد مثل التفنول Tufnol أو النايلون. 6.6 Nylon6.6 يمكن إستخدامها بهذا الخصوص، على الرغم من أن قيم

الصلادة للمواد البوليمرية أقل من سبائك الحديد-كاربون، و لكن في التطبيق مسننات البوليمر Polymer Gears تؤدي وظيفتها بشكل مقبول ولا تتطلب إستخدام عملية التزييت Lubrication. و عليه، يجب أن يكون مهندس التصميم يقظاً من حيث أن الخواص النوعية التي تتميز بها المادة لاتعكس الإسلوب الذي سوف تسلكه المادة خلال التطبيق.

إن الخواص الميكانيكية للمادة، يمكن أن تحدّد أيضاً طريقة إنتاج الجزء. ففي بعض المواد، خواص المقاومة و المتانة، يمكن أن تجعل طرق التصنيع عملية صعبة و بالتالي تكون مرتفعة الكلفة. إن عامل الكلفة الإضافي، يمكن أن يكون نتيجة زياد الفترة الزمنية لعملية التصنيع أو إستخدام عدة خاصة أو كلاهما. إن حل مشكلة عملية الإنتاج يمكن أن يتم بإستخدام طريقة السباكة الدقيقة Investment Casting أو طريقة الشمع المفقود Lost-Wax Method، حيث لايتطلب المنتج النهائي عادة إستخدام عملية التشغيل Machining. ولكن، يجب أن نأخذ بنظر الإعتبار التأثير المباشر لعملية الإنتاج Production Process على الخواص الميكانيكية مثل المقاومة و المتانة. فعند إنتاج الجزء بواسطة السباكة، فإنه سوف يتميز بإتجاه بلوري Crystalline Orientation معين، و سوف لايتميز بخواص إتجاهية Directional Properties إلا عند إستخدام أساليب معينة مثل التجمد الإتجاهي Directional Solidification. أما عندما يخضع الجزء الى عملية التشكيل Forming للحصول على شكل معين، على سبيل المثال بإستخدام الطرق أو الحدادة Forging فإنه سوف يتميز بخواص إتجاهية. إن المعادن المشكلة Worked Metals، أو التراكيب المطروقة Wrought Structures تكون عادة أقوى من المسبوكات Castings باستخدام نفس المادة.

يمكن إنتاج نموذج غفل المسنّن الصغير Small Gear Blank بواسطة عملية تشكيل الغفل Blanking، من الصفيحة المدرفلة على الساخن Hot-Rolled Plate، أو فصل مقطع رقيق من القضيب المدرفل على الساخن Hot Rolled Bar، أو فصل طول معين من القضيب المدرفل على الساخن و تشكيله بالطرق (الحدادة) بشكل نموذج الغفل Blank، فعلى الرغم من أن المادة الأساس Parent Material لنماذج الغفل Blanks تتميز بخواص إتجاهية، إلا أن نماذج الغفل المفردة Individual Blanks تتميز بخواص إتجاهية مختلفة وهذه يمكن أن تؤثر على الخواص الميكانيكية مثل المقاومة. إن هذه الخواص ترتبط عادة بخطوط الألياف Fibres Lines التي تنساب مع تشوّه البلورة Crystal أو الحبيبة Grain الناتج من إتجاه عملية التشكيل.

3.2.1 كلفة الجزء Component Cost

إن كلفة الجزء سوف تؤثر على نوع المادة التي يتم إختيارها و الطريقة أو العملية التي يتم إعتمادها في التصنيع. أما عوامل الكلفة المخفية الأخرى مثل:

1. Rates. تكاليف الضرائب

2. Rent. تكاليف الأجرة

3. Running Costs. تكاليف التشغيل للعدة أو الأجهزة.

فإنها يجب أن تؤخذ بنظر الإعتبار قبل الحصول على الكلفة النهائية لكل جزء Final Cost per Component.

في العديد من الصناعات تقدّر كلفة شراء المواد Purchase Cost بحوالي 50% من كلفة التصنيع الكلية Total Manufacturing Cost للجزء أو المنتج النهائي. و عليه، إستخدام المواد الأولية Raw Materials المنخفضة

الكلفة سوف يخفض من الكلفة الأجمالية Overall Cost، و هذا يجعل تمويل ذلك الجزء أكثر جاذبية من الأجزاء المنافسة. ولكن هذه القاعدة لاتكون صحيحة دائماً، فعندما نأخذ بنظر الإعتبار، المواد المناسبة المستخدمة في تصنيع هيكل الطائرة ذات السرعة مادون الصوتية Subsonic Air Frame، فإن سبيكة المغنيسيوم القوية تتطلب التدبير الوقائي ضد الإشتعال خلال عملية التشغيل، كما أنها تتطلب الحماية ضد التآكل اللاحق. بينما تكون سبائك التيتانيوم أقوى، و تتميز بمقاومة تآكل أفضل مقارنةً مع سبائك المغنيسيوم إلا أن كلفتها عالية جداً. أما سبائك الألمنيوم فإنها قوية أيضاً ولها كلفة منخفضة نسبياً و سهلة التشغيل إلا أنها تتطلب الحماية من التآكل تحت ظروف معينة. و من خلال هذه الإحتمالات الممكنة للمواد التي يمكن إستخدامها كمواد ليهكل الطائرة، نلاحظ أن التكاليف العالية لايمكن تجنّبها بشكل أو بآخر. من هنا، المادة التي تبدو في البداية منخفضة الكلفة لايعني أنها تكون ملائمة عندما نأخذ عوامل الإنتاج الأخرى بنظر الإعتبار.

4.2.1 متطلبات الخدمة (التطبيق) Service Requirements

إن مهندس التصميم يجب أن يضمن أن المادة التي تم إختيارها سوف تكون مستقرة و خالية من الخطر و تؤدي وظيفتها بالشكل المطلوب في التطبيق الذي على أساسه تم إختيارها. ففي العمليات الكيمياوية و النووية، العوامل الرئيسية التي تؤخذ بنظر الإعتبار تتضمن:

1. Structural Stability. الإستقرارية التركيبية

2. Strength. المقاومة

3. Corrosion Resistance. مقاومة التآكل

إن المعادن النقية Pure Metals تتميز عادة بمقاومة تآكل عالية جداً و مقاومة منخفضة، و على الرغم من عمليات التسبيك Alloying Processes، فإنه من الممكن الإحتفاظ بمقاومة التآكل في حالة السبائك Alloys والحصول على المقاومة المطلوبة. إن الأنواع المختلفة من السبائك الحديدية Ferrous Alloys واللاحديدية Non-Ferrous Alloys، يمكن أن تزودنا بالمادة المثالية Ideal Material التي تناسب متطلبات التطبيق المعينة. إن وزن الجزء Component Weight يعتبر من العوامل الحرجة و بشكل خاص في التطبيقات التي تتطلب حفظ الطاقة Energy Conservation، ولهذا تصاميم الطائرات و السيارات تعتمد بشكل كبير على الوزن و ذلك لحفظ الوقود. وعليه، خاصية المقاومة النوعية Specific Strength (نسبة المقاومة/الوزن) يمكن أن تمزج مع الكلال Fatigue، الزحف Creep، التآكل Corrosion...الخ.

إن المصمم يجب أن يكون يقظاً وعلى معرفة وإطلاع بالمعاملات التي تجرى على المادة والتي ترفع من خواص المعادن والسبائك المختلفة وبالتالي يمكنها أن تناسب متطلبات التطبيق. إن هذه المعاملات تتضمن على سبيل المثال:

1. Case Hardening. الإصلاد السطحي

2. Tempering. المراجعة

3. Austempering. المراجعة الأوستينايتية

4. Nitriding. النتردة

5. Solution Treatments المعاملات المحلولية ...الخ

وبالنظر للطلب المتزايد على المواد المعدنية، فإن عملية إختيار المواد يجب أن لاتتم بمعزل عن المعاملات المناسبة التي يمكن أن تكون عملية معاملة سطحية Surface Treatment مثل الأنودة Anodising، الإصلاد السطحي، أو المعاملات التي تؤثر على البنية أو التركيب الداخلي للمادة مثل الإصلاد بالتقسية Quench Hardening، أو المعادلة Normalising التي تزود المادة بالتركيب الذي يناسب متطلبات التطبيق المعين.

هناك قول شائع ينص على أن "جميع المشاكل الهندسية يمكن أن تحل بإستخدام الطريقة المناسبة للتصميم"، على الرغم من أن ذلك يبدو صحيحاً الى حد ما، ولكن في العديد من التطبيقات نلاحظ حدوث الفشل رغم إستخدام التصاميم المناسبة. وهذا في أغلب الأحيان، يعزى الى نقصان الخبرة و البصيرة في متطلبات تطبيق مادة ذلك الجزء مثل الإجهادات الغير متوقعة Unexpected Stresses التي يمكن أن تتضمن:

1. Vibrations. الإهتزازات

2. Temperature Variation. التغير في درجة الحرارة

3. Shock Loading. تحميل الصدمة التي يخضع لها الجزء.

1. 5.2 المتطلبات الوظيفية Functional Requirements

إن المادة التي يتم إختيارها في تطبيق معين يجب أن تحقق الهدف من إختيارها بالشكل المطلوب خلال عمر الجزء. وهذا يتطلب بعض الشروط، منها القابلية على مقاومة جميع حالات التحميل المتوقعة. إن حالات التحميل يمكن أن تتضمن:

1. Dynamic Loading. التحميل الديناميكي (المتحرك)

2Static Loading. التحميل الإستاتي (الساكن)

3Hostile Chemical Atmospheres. الأجواء الكيميائية العدوانية

وكنتيجةً لذلك، عدة إجهادات سوف يخضع لها ذلك الجزء. و عندما يخضع الجزء الى حمل يبقى مستقراً أو ساكناً، فإنه يسمى حالة الإجهاد الساكن Static Stress Situation. إن الأجزاء التي يجب ان تقاوم هذا النوع من الحمل، تستخدم عادة في الأثاث Furniture، تراكيب الأساس المستخدمة في الأبنية Foundations Structures of Building، هياكل القاعدة المسبوكة للمكائن Base Casting Machines .

إن الحمل المسلط في حالة الحركة (على سبيل المثال، جهاز المرفاع Crane Lifting Equipment، نوابض تعليق المركبة Vehicle Suspension Springs) أو التأثيرات الإهتزازية Vibrational Effects ، على سبيل المثال، المثقاب النفحي (الضغطي الهوائي) Pneumatic Drill، تؤدي عادة الى إجهادات ديناميكية. إن هذه الإجهادات يمكن أن تنشأ أيضاً من التاثيرات الحرارية الناتجة من التمدد والإنكماش. و عليه، عند تصميم جهاز المعاملة الحرارية Heat Treatment يجب أن يؤخذ بنظر الإعتبار النوع الأخير من الإجهادات الديناميكية. أما عند تصميم وحدة الصناعة الكيمياوية Chemical Plant، فإن الإجهادات يمكن أن تمتد من الإجهادات الساكنة في حالة حاويات الخزن الكيمياوي Chemical Storage Containers الى الإجهادات التي تنشأ بواسطة الهجوم الكيمياوي Chemical Attack أي التآكل. أن الوسط التآكلي يمكن أن يكون غير مباشر Indirect نتيجة التلوث الناتج من الغازات المبددة Waste Gases أو يكون بشكل تماس مباشر Direct Contact ، مع مواد التآكل أي المحاليل الملحية Salt Solutions و الحوامض Acids، على سبيل المثال. إن هذه

الأوساط تتميز بالعدوانية الشديدة، وعليه، مواد مرتفعة الكلفة، أو معاملات سطحية تتطلب عادة لخفض هجوم التآكل.

ومهما كان معدل التآكل، فإن الجزء يجب أن يكون قوياً بمافيه الكفاية بحيث يكون مأموناً Safe و مؤدياً الوظيفة بالشكل المطلوب. و بغض النظر عن الأوساط الكيمياوية، فإن الإجهادات الناتجة من الهجوم التآكلي Corrosion Attack يمكن أن تنشأ من الإختيار الخاطئ للمادة. و في هذه الحالة تنشأ خلية إلكتروليتية Electrolitic Cell حيث يخضع جزء من المنتج الى التآكل بشكل مضحي Sacrificial. إن سبب فشل العديد من الأجزاء و التراكيب بشكل سابق لأوانه، ينشأ من الأخطاء في الحكم Judgment، حول قابلية المادة المختارة و الإجهادات الطبيعية التي تخضع لها. و مع تطور تكنولوجيا الحاسوب و التصميم بمساعدة الحاسوب Computer Aided Design (CAD)، من الممكن محاكاة Simulation، حالات الإجهادات المتوقعة و هذا بدوره يحسّن من عملية إختيار المادة و تصميم الجزء.

6.2.1 خواص المادة Material Properties

إن نجاح مهندس التصميم Design Engineer، يعتمد الى حد ما على معرفته بالمواد و كيفية إنسيابها و تشكيلها خلال عملية التصنيع. إن مثل هذه المعرفة بخواص المواد سوف تضمن الإختيار المناسب لعملية التشكيل Forming Process. كما أن بعض المواد مثل الرصاص Lead لايمكن سحبه بنجاح بشكل سلك Wire و لايمكنه الإستجابة الى عمليات عدة القطع Cutting Tool Operations، للحصول على الشكل المطلوب. إن الرصاص يبدي عادة مقاومة منخفضة للقوة المسلطة إلا أنه سوف لايخضع الى القص بالشكل المقبول للحصول على نوعية إنهاء سطحي جيدة.

و كماهو معروف أن خاصية قابلية الطرق Malleability تمكّن من إجراء عمليات البثق Extrusion Processes بنجاح و بالتالي يمكن إنتاج سلك الرصاص. و على الرغم من سهولة و بساطة هذا المثال المتعلق بتفاعل المادة مع حالات التحميل المختلفة مثل:

1. الشد Tensile (مثل سحب الأسلاك Wire Drawing.)

2. القص Shear (مثل أداء عدة القطع Cutting Tool Action.)

3. الضغط Compression (مثل البثق Extrusion.)

إلا أنه يوضح أهمية معرفة خواص المواد. إن المواد المختلفة تتميز بخواص فيزيائية مختلفة. و هذه الخواص سوف تحدّد إختيار المادة، و الآن، نتطرق إليها بشكل موجز.

مقاومة الشد Tensile Strength

إن هذه الخاصية، تمكّن المادة من مقاومة قوة الشد. كما أن التركيب الذري أو الجزيئي يزود هذه المقاومة الداخلية Internal Strength.

الصلادة Hardness

درجة مقاومة الثلم Indentation، البري أو الحك Abrasion، البلى Wear، وهذه المقاومة يمكن الحصول عليها بواسطة تقنيات المعاملة الحرارية Heat Treatments Techniques أو تقنيات التسبيك Alloying Techniques التي تخفض أو تمنع الذرات من الإنزلاق في داخل المادة.

مقاومة البلى Wear Resistance

قابلية المادة على حفظ أبعادها الفيزيائية عندما تخضع الى تماس الإنزلاق Sliding أو الدرفلة Rolling مع العضو الثاني. و هذه الخاصية تكون عادة مرتبطة مع خاصية الصلادة.

المطيلية **Ductility**

إن هذه الخاصية مرتبطة مع عمليات سحب الأسلاك على البارد Cold Wire Drawing و تتضمن التخصّر التدريجي في مساحة المقطع العرضي من دون حدوث التمزق، على سبيل المثال، النحاس له مطيلية عالية جداً بخلاف الرصاص.

مقاومة الصدمة **Impact Strength**

مقياس إستجابة المادة لتحميل الصدمة. فالزجاج، حديد الزهر، و الماس مواد لها مقاومة صدمة منخفضة، بينما المطاط و بعض البوليمرات يتميز بمقاومة صدمة عالية.

الموصلية الكهربائية **Electrical Conductivity**

إن المادة التي تبدي مقاومة صغيرة لمرور التيار الكهربائي تتميز بموصلية كهربائية عالية، حيث يسهل إنسياب الإلكترونات في داخل المادة عندما تخضع الى مصدر إلكترونات خارجي. إن جميع المعادن و كذلك المواد اللامعدنية مثل الكاربون تعتبر موصلات كهربائية جيدة.

الخواص المغناطيسية **Magnetic Properties**

يطلق على المواد التي تنجذب بشدة نحو مجال القوة المغناطيسية، الناتج من المصدر الكهربائي الخارجي أو المغناطيس الدائم Permanent Magnet مواد المغناطيسية الحديدية (العالية الإنفاذية) Ferromagnetic Materials. إن

العناصر الشائعة التي تسلك هذا السلوك تتضمن: الحديد Fe، النيكل Ni، الكوبلت Co.

الموصلية الحرارية Thermal Conductivity

إن خاصية توصيل المادة للحرارة تسمى الموصلية الحرارية. بعض المواد مثل النحاس و الألمنيوم تعتبر موصلات حرارية عالية التوصيل الحراري. و نظراً لهذه الخاصية يمكن إستخدام هذه المواد في العديد من التطبيقات مثل لقم كاوية اللحام Soldering Iron Bits , أدوات الطبخ المنزلية Cooking Utensils...الخ، مقارنةً مع المواد المنخفضة التوصيل الحراري مثل الأسبستوس Asbestos، الخشب Wood، و بعض البوليمرات التي تستخدم بشكل عوازل حرارية Heat Insulators مثل مقابض أدوات الطبخ المنزلية Handles for Cooking Utensils، صناديق الأفران Furnace Boxes.

الكثافة Density

مقياس المادة لرص Pack كتلة معينة في حجم معين. إن كيلوغرام من الريش Feathers و كيلوغرام من الرصاص Lead لهما نفس الكتلة إلا أن حجمهما مختلف تماماً. و عليه، تتميز هذه المواد بقيم كثافة مختلفة. إن العامل المهم، هو

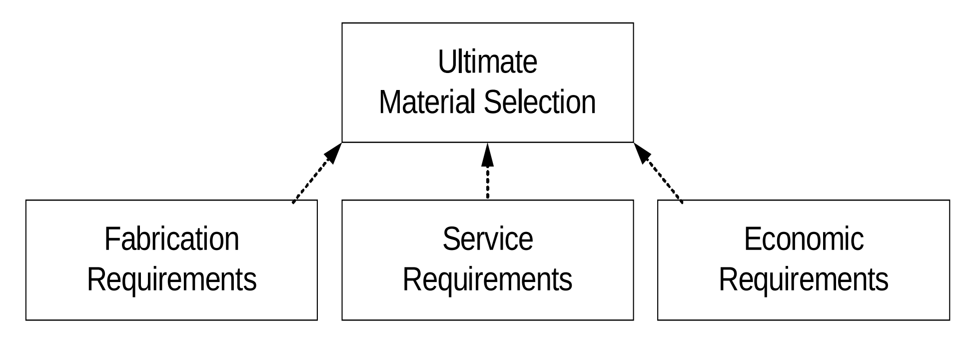
عندما يكون الوزن و بالتالي الكتلة، عاملاً حرجاً كما هو الحال في تراكيب الطائرات. و من جانب عامل الأمان، خفض إجمالي كتلة الجزء يجب أن لايؤدي الى خفض مقاومة الجزء.

مقاومة التآكل Corrosion Resistance

إن المواد التي لا تتحلل كيمياوياً في الأوساط الغريبة Alien Environment، تتميز عادة بمقاومة تآكل جيدة. إن الوسط الغريب يمكن أن

يكون، الماء المالح Salt Water، الجو الملوث Polluted Atmosphere، المحاليل أو الأجواء ذات الحامضية العالية High Acidic Atmosphere or Solution. إن درجة الحرارة يمكن أن تؤثر على هذه الخاصية، كما هو الحال، في الطبقة الأوكسيدية Oxidation Film، التي تتكون في الفولاذ الساخن Hot Steel. إن هذا التفاعل يمكن إعتباره تآكل معجّل Accerlated Corrosion أو أكسدة Oxidation.

إن الخواص الفيزيائية و الميكانيكية للمادة المختارة لتصنيع جزء معين، يجب أن تحقق شروط التصنيع Fabrication Requirement، و شروط التطبيق Service Requirement. إن سهولة التشكيل، التشغيل، أو الحصول على سائل أو مائع السباكة سوف يؤثر على الكلفة النهائية للجزء. و من العوامل المهمة جداً، هي معولية Reliability المواد بينما تكون في التطبيق. إن الفشل السابق لأوانه نتيجة الزحف Creep، الكلال Fatigue، فقدان الصلادة Hardness Loss، يكون عادة مكلف عند إستخدام المواد الرديئة Low Grade Materials. إن التفاعل مابين متطلبات التصنيع، متطلبات التطبيق، المتطلبات الإقتصادية لإختيار المادة المثلى Optimum Material مبين في الشكل 2.1.



- Plasticity
- Malleability
- Ductility
- Casting Properties
- Directional Properties
- Ease of Joining
- Machinability
- Response to Surface Treatments
- Response to Heat Treatment

- Strength
- Hardness
- Rigidity
- Toughness
- Corrosion Resistance
- Creep Resistance
- Fatigue Resistance
- Electrical Conductivity
- Thermal Conductivity
- Weight
- Magnetic Properties
- Elasticity Properties

- Cost of Raw materials
- Cost of Machine
- Cost of Designing
- Cost of Joining
- Cost of Fabrication
- Cost of Casting

الشكل2.1

العوامل المؤثرة على إختيار المادة

من هنا، يمكن تقسيم متطلبات إختيار المواد الهندسية الى:

متطلبات التصنيع .1Fabrication Requirements.

متطلبات الخدمة أو التطبيق .2Service Requirements.

المتطلبات لإقتصادية .3Economic Requirements.

متطلبات التصنيع Fabrication Requirements

حيث تتضمن:

- اللدونة Plasticity.
- قابلية الطرق . Malleability
- المطيلية Ductility.
- خواص السباكة Casting Properties.
- الخواص الإتجاهية Directional Properties.
- سهولة الربط Ease of Joining.
- قابلية التشغيل Machinability.
- الإستجابة للمعاملات السطحية Response to Surface Treatment.
- الإستجابة للمعاملات الحرارية Response to Heat Treatments.

متطلبات الخدمة أو التطبيق **Service Requirements**

و تتضمن مايلي:

- المقاومة Strength.
- الصلادة Hardness.
- الجساءة Rigidity.
- المتانة Toughness.
- مقاومة التآكل Corrosion Resistance.
- مقاومة الزحف Creep Resistance.
- مقاومة الكلال Fatigue Resistance.
- الموصلية الكهربائية Electrical Conductivity.

- الموصلية الحرارية Thermal Conductivity.
- الوزن Weight.
- الخواص المغناطيسية Magnetic Properties.
- خواص المرونة Elasticity Properties.

المتطلبات الإقتصادية **Economic Requirements**

و تتضمن:

- كلفة المواد الأولية Cost of Raw Materials.
- كلفة الماكنة Cost of Machine.
- كلفة التصميم Cost of Designing.
- كلفة الربط Cost of joining.
- كلفة التصنيع Cost of Fabrication.
- كلفة السباكة Cost of Casting.

7.2.1 تركيب (بنية) المادة Material Structure

إن مادة هندسية مثل سبيكة الفولاذ الكاربوني الحاوي على 4%C0. و التي تخضع الى معاملة حرارية مناسبة يمكن إستخدامها بشكل مقبول في حالة النوابض Springs. إن مثل هذه المادة التي تتميز بقابلية على مقاومة الأحمال الصدمية Shock Loads من دون حدوث الكسر يمكن إعتبارها مادة متينة Tough. و المواد الأخرى التي تستجيب بشكل مقبول الى التحميل الصدمي، تتضمن المطاط المصلّد بواسطة الكبريت Vulcanised Rubber و العديد من البوليمرات اللدنة حرارياً Thermoplastic Polymers. و على الرغم من أن هذه

المواد يمكنها أن تحقق شروط التطبيق الذي يتطلب المتانة، فإن السبائك هي المواد الوحيدة التي يمكنها أن تتميز بهذه القابلية بواسطة المعاملة الحرارية المناسبة. و بخلاف ذلك، يبدي المطاط والبوليمر، خواص مرونة عالية مقارنة مع السبائك.

إن تفاعلات المادة المختلفة التي تنشأ بواسطة الإستجابة للمعاملات الحرارية المختلفة أو الإجهادات المسلطة هي نتيجة التركيب الداخي المتباين للمواد المعدنية واللامعدنية. إن التشوه Distortion ، الذي تخضع له المعادن بواسطة التشكيل Working أو المعاملة الحرارية يحدث عادة في الترتيب الذري المنتظم Ordered Atomic Arrangement، و هذه العمليات يمكن أن تعيق الإنزلاق الذري Atomic Slip أو كما في عملية المراجعة Tempering التي تسهّل عملية الإنزلاق وبالتالي تصبح المادة أكثر لدونة Plasticity. و بخلاف المعادن، يتميز المطاط و البوليمرات اللدنة حرارياً بالسلاسل الجزيئية المتشابكة Entangled Molecular Chains.

وعليه، لاتمتلك، نفس الدرجة من الترتيب الذري الموجود في المعادن و لهذا لايمكن إعتبارها مواد بلورية Crystalline Materials. إن خواص المواد الهندسية ترتبط بشكل مباشر مع الترتيب الداخلي للذرات أو الجزيئات و كيفية تفاعل هذه الترتيبات مع بعضها. إن إدراك التشابه و الإختلاف مابين المواد يعتبر من الأمور المهمة جداً بالنسبة لمهندس التصميم. و هذه المعرفة، تمكّنه من إختيار المواد الأكثر ملائمة.

يمكن تصنيف المواد الى عدة أصناف، إعتماداً على ترتيبها الذري أو الجزيئي إلا أن التصنيف العام للمواد الهندسية يتضمن: مواد معدنية Metallic Materials، و مواد لامعدنية Non-Metallic Materials.

المعادن Metals

عندما تحوي هذه المواد على ذرات الحديد Iron Atoms أو الفرايت Ferrite فإنها تصنف بشكل مواد حديدية Ferrous Materials، وبخلاف ذلك، تصنف بشكل مواد لاحديدية Non-Ferrous Materials. وفي هذه المواد تترتب الذرات بشكل نماذج منتظمة تسمى وحدات الخلية Unit cells. والنماذج الشائع تتضمن:

- المكعب المتمركز الوجه (Face Centred Cubic (F.C.C.
- المكعب المتمركز الجسم (Body Centred Cubic (B.C.C.
- السداسي المكتظ المغلق (Hexagonal Close Packed (H.C.P.

تتميز المواد المعدنية، بالبريق و اللمعان السطحي العالي Surface Lustre، التوصيل الحراري، التوصيل الكهربائي الجيد.

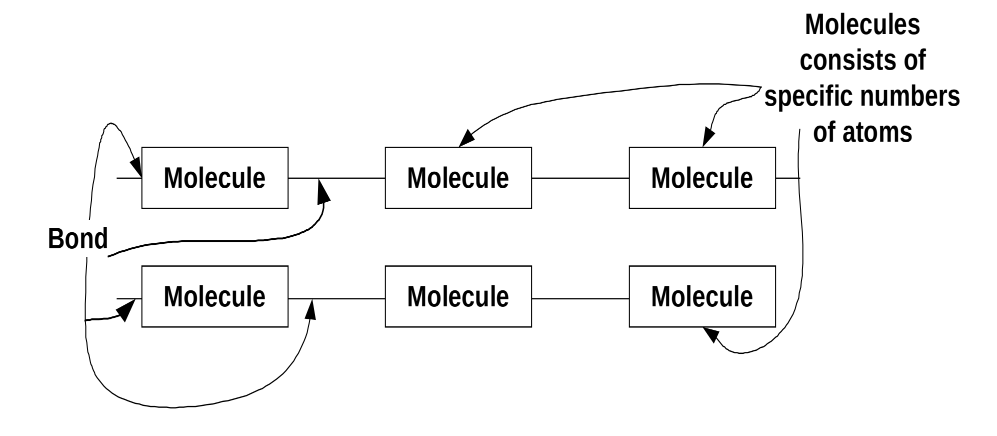
أضف الى ذلك، أن هذه المواد يمكن أن تكون قابلة للطرق Malleable، مطيلية Ductile، قوية Strong، متينة Tough، و صلدة Hard. إن هذه الخواص تحدّد بواسطة كمية الإنزلاق الذري الذي يحدث داخل ترتيب وحدة الخلية. كما أن المعادن يمكن أن تكون مواد مغناطيسية Magnetic Materials، أو لامغناطيسية Non-Magnetic Materials، ولها مستويات مختلفة من مقاومة التآكل. أن المعادن تستجيب عادة بسهولة للحام Welding، اللحام بالنحاس الأصفر أو القصدير Brazing، لحام الكاوية Soldering، و يمكن تشكيلها بواسطة الطرق أو الحدادة Forging، السباكة Casting، والتشغيل Machining.

البوليمرات اللدنة حرارياً Thermoplastic Polymers

في هذه المواد تترتب الذرات بحيث تكوّن سلاسل جزيئية بشكل نماذج خطية Linear أو متفرعة Branched (الشكل 3.1). إن هذه اللدائن Plastics أو البوليمرات Polymers تتميز بقابليتها على التطرية أو التليين Softening و

إعادة التشكيل Reforming بشكل متكرر بإستخدام الحرارة و الضغط المسيطر عليهما. إنها مواد غير مغناطيسية، وبإستثناء أنواع معينة من الحوامض، تتميز بمقاومتها الجيدة للتآكل. ويمكن تشكيلها بواسطة القولبة Moulding، التشكيل بواسطة النفخ في الفراغ Blow-Vacuum Forming. و يمكن تشغيلها بسهولة. كما يمكن لحام أو ربط هذه البوليمرات باستخدام طرق تصنيع معينة. والأمثلة النموذجية على البوليمرات اللدنة حرارياً تتضمن:

- النايلون Nylon.
- البولي أثيلين Polyethylene.
- البولي فينل كلورايد Polyvinyl Chloride (PVC).



الشكل3.1

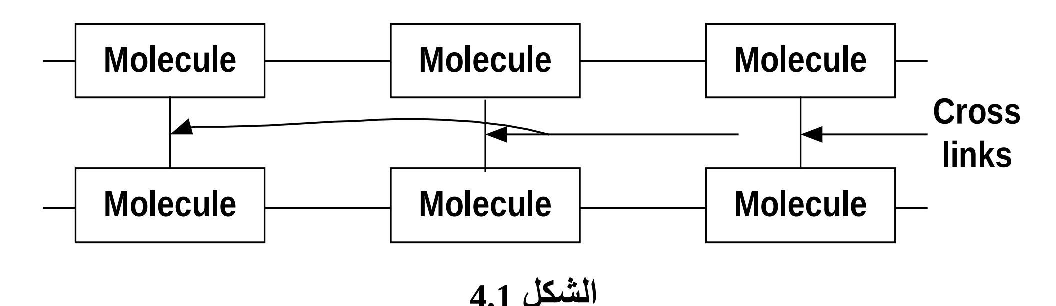
السلسلة الجزءية الخطية في البوليمرات اللدنة حرارياً

البوليمرات الصلدة حرارياً Thermosetting Polymers

تسمى هذه البوليمرات أيضاً، لدائن الأصلاد الحراري Thermoplastic Plastics، حيث يحدث التغير الكيميائي عندما تخضع هذه البوليمرات الى الحرارة والضغط، التي تؤدي الى نشوء الربط المستعرض Cross-Link مابين السلاسل الجزيئية (الشكل 4.1). إن وجود هذا النوع من الربط يمنع السلاسل الجزيئية من الإنزلاق مع بعضها البعض، و نتيجةً لذلك، لايمكن إعادة تشكيل المادة.

و نظراً لوجود الربط المستعرض، فإن هذه البوليمرات لاتستجيب الى الإضافات مثل المواد الملدّنة Plasticisers، و بالتالي تكون المادة جسوءة Rigid، و غير مرنة Inflexible. و الأمثلة النموذجية على اللدائن الصلدة حرارياً تتضمن:

- الفينول فورمال ديهايد Phenolformal –dehyde.
- البولي يورثين Polyurethane.



الشكل 4.1

السلسلة الجزءية الخطية في البوليمرات اللدنة حرارياً

الإيلاستوميرات **Elastomers**

مواد بوليمرية تتميز بقابليتها على الإستطالة Extension، بكميات كبيرة من دون حدوث الكسر. إن المطاط الطبيعي Natural Rubber يعتبر من الأمثلة الشائعة على هذا النوع من البوليمرات حيث يمكن أن يخضع الى الإستطالة بمقدار كبير جداً و بالإسلوب المرن Elastic Manner. إن المواد التي تستجيب الى هذا النوع من السلوك المرن تسمى الإيلاستوميرات Elastomers.

المواد السيراميكية **Ceramic Materials**

حيث تعتبر مواد بلورية Crystalline Materials، أي أن ذراتها تترتب بإسلوب منتظم. و هي مواد تتميز بهشاشية عالية جداً، و تنكسر من دون الخضوع Yielding بواسطة الإسلوب اللدن Plastic Manner. إن تطبيقات المواد السيراميكية تمتد من ادوات الخزف الصينية (الكاؤلين) China Clay (Kaolin) مثل:

- الخزفيات المنزلية Domestic Crockery.
- العوازل الكهربائية Electrical Insulators.
- عوازل شمعة الإشعال بالشرر Sparking Plug Insulation.

الى إنتاج قوالب السحب Drawing Dies، لقم عدة القطع Cutting Tool Tips...الخ.

إن هذه المواد تتميز بقيم صلادة أعلى من الفولاذ الكاربوني المصلّد Hardened Carbon Steel، و إستجابة للإجهادات الضغطية Compression Stresses

أفضل مقارنة مع الإجهادات الشدية Tensile Stresses. إن الأجزاء السيراميكية يتم تشكيلها عادة بواسطة القولبة Moulding أو الضغط Pressing،

من المزيج الطيني Clay-Mix المعين، و من ثم تخضع الى الحرق Fire، أو التلبيد Sintering للحصول على الصلادة المطلوبة.

الخشب Wood

يعتبر الخشب من المواد المهمة جداً في الصناعة الإنشائية Construction Industry. و تقسم هذه المواد عادة الى مجموعتين رئيسيتين:

- الخشب الرخو (اللين) Soft Wood.
- الخشب الصلد Hard Wood.

و يمكن الحصول على الأخشاب اللينة من أشجار الصنوبر Pine، التنّوب Spruce، و الأشجار الأخرى ذات المحمل المخروطي Cone-Bearing. أما الأخشاب الصلدة، فيمكن الحصول عليها من الأشجار النفضية Deciduous Trees، اي الأشجار التي تفقد أوراقها كل سنة. و الأخشاب الصلدة الشائعة الإستخدام تتضمن: خشب المرّان Ash، خشب الدردار Elm، خشب السنديان Oak. و يجب تجفيف الأخشاب المقطوعة قبل الإستخدام و ذلك لخفض محتوياتها من الرطوبة. و تصل نسبة التطبيقات المنزلية الى حوالي 14%، بينما التطبيقات الغير منزلية تصل الى حوالي 22%.

إن هذه المواد يمكن ان تخضع الى الهجوم بواسطة الفطريات Fungi، أو الحشرات Insects، وعليه تتطلب هذه المواد معاملات خاصة لحمايتها من هذا الهجوم. إن بعض المعاملات يمكن ان تزود هذه المواد بقابلية على مقاومة الإحتراق Fire Resistance. إن تركيب هذه المواد مكون من ألياف Fibres أو

خلايا Cells بأطوال طويلة، حيث تستجيب الى مقاومة الشد التي تصل الى 6 2. MPa، عندما تكون موازية لأليافها في حالة الأخشاب الصلدة، والى MPa2 4. في حالة الأخشاب اللينة. إن الأجزاء الخشبية يمكن ربطها مع بعضها بواسطة الغراء Glue، أو المواد اللاصقة Adhesives، كما يمكن تثبيتها بواسطة المسامير Nails، اللوالب Screw، البراغي Bolts.

8.2.1 الإنتفاع أو الإستفادة من المادة Materials Utilisation

نظراً للمدى الواسع من الإستخدامات الهندسية للمعادن، البوليمرات، المواد السيراميكية، الأخشاب، الجداول 18.1-1.، تبين التطبيقات الهندسية الأكثر شيوعاً. إن الهدف من ذلك، هو لتوضيح مدى الإستفادة من المواد الهندسية. إن الجدوال الخاصة بالمعادن تقسم الى معادن حديدية و معادن لاحديدية، و كذلك، تقسم المعادن الحديدية بدورها الى، سبائك الفولاذ المنخفضة الكاربون، العالية الكاربون، و سبائك الفولاذ السبائكي الخاصة Special Alloy Steels. و عندما يقوم المهندس بتصميم الجزء فإنه يجب أن يختار المواد التي سوف تبدي الخواص المطلوبة. و عندما يكون المطلوب أكثر من خاصية، فإن إختيار المواد المناسبة يصبح أكثر تعقيداً. الجدول 9.1 يبين مقارنة مابين بعض خواص المواد الهندسية. حيث يتم عادة عزل المواد التي تبدي الخواص المطلوبة ومن ثم تخضع الى تحليل مفصّل حتى يتم إختيار المادة أو المواد المناسبة المتوفرة.

Class	Description	Application
Dead mild steel	Conttains around 0.1%C	ألواح هيكل السيارة Automobile body panels
Mild steel	0.2-0.3%C	العوارض Joists ، صفائح مراجل بناء السفن Shipbuilding boiler plate
Medium-carbon steel	0.4-0.7%C	النوابض Springs ، المسننات Gears ، محاور الدولاب Axles
High-carbon steel	0.8-1.2%C	المثاقب Drills ، عدة المخرطة Lathe Toos ، المبارد Files ، القوالب Dies
Cast iron	2.3-4%C	مجموعة إسطوانة المحرك Engine Cylinder Blocks
	Grey cast iron	طبلة المكبح Brake drums .
	Malleable cast iron	عمود إدارة الكامات Cam shafts ، المسننات Gears
	Spheroidal cast iron	عمود المرفق Crankshafts

الجدول1.1

تطبيقات سبائك الفولاذ الكاربوني وحديد الزهر (معادن حديدية).

Class	Description	Application
Low alloy steel	0.8%C	نوابض الصمام Valve springs ، نوابض المركبات Vehicles springs
	0.4%Si	
	0.8%Mn	
Low alloy steel	1%C	محامل الكريات و المحامل الدحروجية Ball and rollers bearings
	0.45%Mn	
	1.4%Cr	
Die steel	0.35%C	قوالب التشكيل على الساخن Hot working dies to operate at 700°C
	3.5%Cr	
	10%W	
High speed steel	0.75%C	عدد القطع التي تعمل عند درجات حرارية عالية و ضغوط
	4.5%Cr	شديدة Cutting tool material to operate at high
	20%W	temperatures and severe pressure
	10%Co	
	1%V	
Ferritic stainless steel	0.1%C	قابلية على التشكيل على البارد لتشكيل أحواض الغسيل Sinks
	16%Cr	و التطبيقات المنزلية الأخرى
Austenitic stainless steel	18%Cr	الوحدات الكيمياوية Chemical plants ، أجزاء معالجة الطعام
	8%Ni	و الأجزاء الهندسية النووية ، Food processing
Martensitic stainless steel	0.1%C	أدوات القطع Cutlery ، أجزاء المحرك الغازي
	13%Cr	Gas turbine components
	0.5%Mn	

الجدول2.1

تطبيقات سبائك الفولاذ السبائكي (معادن حديدية).

Class	Application
Cellulose nitrate	Cutlery handles مقابض أدوات القطع
(Poly(Cellulose nitrate))	Tool handles مقابض العدد
	Piano keys مفاتيح البيانو
Cellulose acetate	Artificial leather الجلد الصناعي
(Poly(Cellulose ethanoate))	Toys الدمى
	Wire covering غطاء الأسلاك
Polvinyl chloride	
(Poly(chloroethene))	
1-Rigid	Piping شبكة الأنابيب
	Safety helmets خوذ الأمان
2-Plasticised	Rain coat معطف المطر
	Leather coat نسيج الجلد
Polvinyl chloride acetate	Screens شبكات الترشيح
(Poly(chloroethene)ethanoate)	Protective clothing الألبسة الواقية
Polethylene	Packaging film أغشية التعبئة و التغليف
(Poly(ethene))	Electrical insulation العزل الكهربائي
Polypropylene	
(Poly(Propene))	Freezer components أجزاء حجرة التجميد في الثلاجة أو المجمدة
	Cable insulation كبل العزل الكهربائي
Polystyrene	Toys الدمى
(Poly(Phenylethene))	Ceiling tiles قرميدة السقوف
	Food containers حاويات الأطعمة
	Protective packaging materials مواد التعبئة أو التغليف الواقية
ABS(acrylonitrile butadiene styrene)	Automobile bodywork هيكل السيارات
(Poly(propenitrile)buta 1,3 diene	Pumps المضخات
Poly(phenylethene))	Protective helmets خوذ الأمان
PTFE(polytetrafluoroethylene)	Bearings المحامل
(Poly(tetrafluoroethene)	Non-stick coatings التغطيات (الطلاء) الغير لصوقة
Nylon	Gears المسننات
(Poy(amide))	Fishing line حبل صيد الأسماك
	Brush bristle شعر الفرشاة
	Ropes الحبال
	Cams الكامات
	Cable covering غطاء الكبل
	Clothes الأقمشة
Polyester(Terylene)	Clothing غطاء الجدران أو السقوف
Acrylics(Perspex)	Aircraft windows نوافذ الطائرات
(Poly(methyl 2-methyl propenoate)	lenses العدسات
	Baths أحواض الغسيل

Note:Modern generic names given in brackets

الجدول4.1

تطبيقات اللدائن اللدنة حرارياً

Class	Application
Phenolics	
Penol formaldehyde (Bakelite)	Electrical equipment buttons أزرار الأجهزة الكهربائية
(Poly(phenol methanal)	Gears المسننات
Urea formaldehyde	Adhesives الأشرطة اللاصقة
(poly(carbamide methanal)	Cups الأكواب أو الأقداح
	Saucers الصحون
Melamine formaldehyde	Buildinds panels ألواح الأبنية
(Poly(Melamine methanal)	Crockery الخزفيات
	Electrical equipment الأجهزة الكهربائية
Polyesters	Boat hulls laminated structures التركيب الطبقية في هياكل الزوارق
	Car bodies هياكل السيارات
	Adhesives الأشرطة اللاصقة
Polyurethanes	Gears المسننات
	Wire coatings غطاء الأسلاك

Note:Modern generic names given in brackets

الجدول5.1

تطبيقات اللدائن الصلدة حرارياً.

Class	Application
Natural rubber +5%sulphur(Vulcanised)	Vibration Damping pads وسادة تخميد الإهتزازات
	Gloves القفازات
	Sealing rings حلقات منع التسرب
	Gaskets طوق أو حشوة منع التسرّب
Synthetic rubber	Footwear (حذاء،خفز...الخ) ألبسة القدم
	Hosepipes أنابيب الخراطيم
	Cable insulation عزل الكبل الكهربائي
Highly vulcanised rubber	Automobiles tyres إطارات السيارات

الجدول6.1

تطبيقات الإستوميرات

Class	Application
Ceramic for high temperature Applications	شمعة الإشعال بالشرر Spark plugs
	البوادق Crucible
	بطانة الأفران Furnace linings
	غلاف البيروميتر Pyrometer sheathes
Ceramic for strength and abrasion qualities	الألبسة الصحية Sanitary wear
	مواد عدد القطع للمطاط ، اللدائن ، بعض المعادن
Ceramic+metal powders (Cermets)	لقم العدة الملبّدة Sintered tool tips
	شعيرة مصابيح الإضاءة Light-bulb filaments
	أجزاء محرك الصاروخ Rocket-engine components

الجدول1.1

تطبيقات المواد السراميكية

Class	Application
Soft wood	دعائم سقف المنجم Pit props
	لباب الورق Paper pulp
	الألواح الصلدة Hard-board
	متطلبات الصناعة الإنشائية Building industry requirements
Hard wood	مقابض العدد Tool handles
	صناديق تشكيل قلوب المسبوكات Foundry core boxes
	نماذج السباكة Foundry patterns
	الأثاث Furniture
Laminated wood	
	التطبيقات البحرية Marine applications
	الأثاث Furniture

الجدول1.1

تطبيقات الخشب.

	Metals	Thermosetting	Thermoplastic	Elastomers	Ceramics	Wood
Density (Kg/m^{3}X10^{-3})	(2-16)	1.2-2.0	0.9-1.4	0.9	(2-17)	0.6(Oak)
Hardness	Medium to high	Low to medium	Low	Low	Very high	Low to medium
Tensile strength (MN/m^2)	Up to 2500	35-80 laminates up to 420	(7-80)	17-500	Up to 400	With grain 9 Mpa, normal to grain 1.5 Mpa
Thermal conductivity	Medium to high	Very low	Very low	Very low	Very low	Low
Corrosion resistance	Low to medium	High	High	High	High	Susceptible to fungal attack
Toughness	Low to medium	High	Very high	Very high	Very low	Depends upon grain direction
Electrical conductivity	Conductors	Insulators	Insulators	Insulators	Insulators	Insulators
Magnetic properties	High (except austenitic and non-ferrous materials)	None	None	None	None	None
Wear resistance	Low to high	Medium	Low	Low	Very high	Very low
Ductility(elongation(%))		0.5-1.5	2-850	700-1000	Negligible	Negligible

الجدول1.1

مقارنة خواص المواد.

3. 1تحليل الفشل Failure Analysis

بالإضافة الى الفحوصات الدورية، في التطبيق، فإن إحدى الأساليب المهمة جداً بالنسبة الى المهندسين، هو تحديد فيما إذا كان إختيار و تصميم المادة قد أنجز بشكل مناسب بحيث يمكن إستيعاب تحليل أي فشل يمكن أن يحدث، و لسوء الحظ، يحدث الفشل في بعض الأحيان. و هذا يعزى الى مجموعة من العوامل المشتركة المطلوبة في مرحلة تصميم Design، إنتاج Production، إستخدام Utilisation الأجزاء الهندسية وهذه العوامل تتضمن:

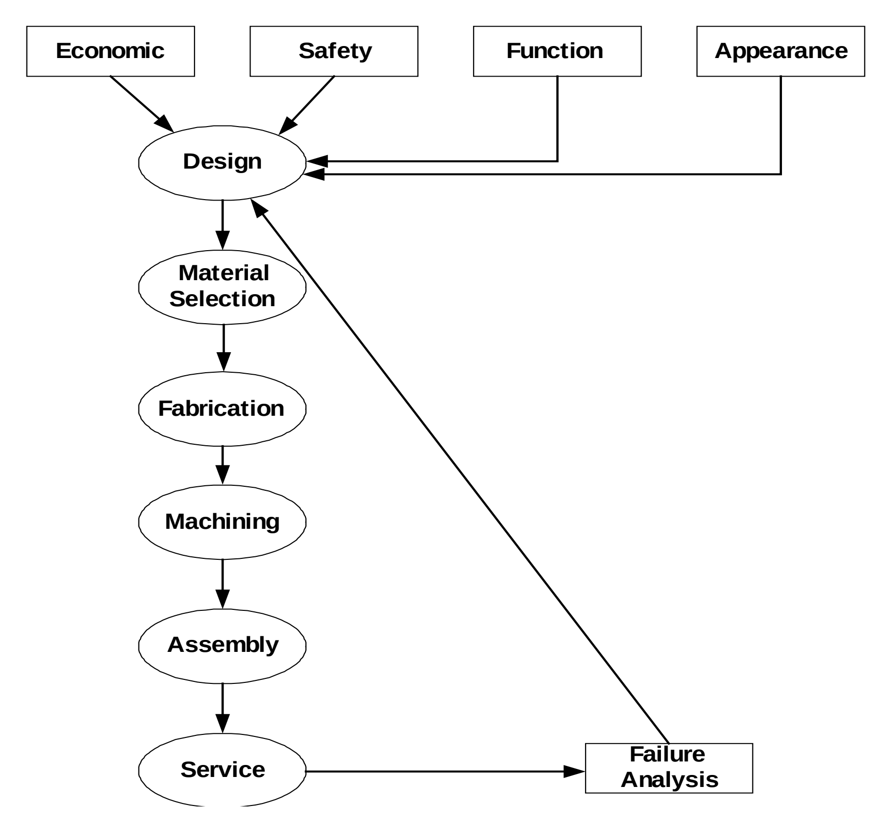
- عيوب المادة Material Defects.
- التغيّر في الخواص Variation in Properties.
- التصميم الغير المناسب Inadequate Design.
- عدم السيطرة بشكل مناسب على طرق التصنيع أو المعالجة Inadequately Controlled Processing.

- المهارات العملية الضعيفة Poor Workmanship.
- الصيانة الغير كافية Inadequate Maintenance.
- ظروف التطبيق العكسية أو الغير متوقعة Adverse or Unexpected Service Conditions.
- سوء الإستخدام أو الإهمال Abuse or Negligence.

و على الرغم من الإستهلاك الكبير في الوقت Time-Consuming الذي تتطلبه عملية دراسة جزء أو نظام قد خضع الى الفشل، إلا أن المعلومات التي يمكن الحصول عليها من برنامج تحديد و تشخيص الخطأ و الفشل Postmortem تكون عادة جداً قيمة و يجب الإحتفاظ بها و عدم إضاعتها. إن التطبيق المناسب لمعلومة تحليل الفشل Failure Analysis Information يمكن أن يزودنا بملحق مساعد و قيّم في مرحلة الإدخال الهندسي الكلي Total Engineering Input، بالنسبة لتصميم المنتج. لأن هذا الملحق يتضمن:

- عيوب التصميم Design Flaws.
- عيوب و محددات المادة Material Defects and Limitations.
- عيوب التصنيع Fabrication Defects.
- الإستخدام الخاطئ للمنتج Incorrect Usage of Product.

إن هذه البيانات ربما تكون الحلقة الأخيرة Last-Link في سلسلة الحصول على المنتج Product Chain كما مبين في الشكل 51..



الشكل5.1

5.1 علاقة تحليل الفشل مع تصميم وإنتاج الأجزاء الهندسية

وهذه يجب ان توجّه الى مرحلة التصميم من عملية تطوير المنتج كما مبين في الشكل أعلاه. إن مثل هذه الخطوات المستخدمة في تحليل الفشل يمكن أن تؤدي الى تحسين:

- المعولية الإجمالية Overall Reliability.
- الأمان أو سلامة المنتج Safety.
- الإنتفاع من المنتج Usefulness of a Product.

•

المسائل Problems

1) ماهي الإعتبارات التي تؤخذ بنظر الإعتبار في حالة:

أ. التصميم Design.

ب. الخدمة أو التطبيق Service.

ج. الوظيفة Function.

2) إقترح المادة المناسبة للتطبيقات التالية:

أ. المثاقب Drills.

ب. محمل الكرات Ball Bearing.

ج. أحواض الغسيل Sinks.

د. أدوات القطع Cutlery.

هـ. المشعاع Radiators.

و. تعبئة الأطعمة Food Packaging.

ز. الحلى jewellery.

ح. العملات Coins.

ط. مفاتيح البيانو Piano Keys.

ي. البوادق Crucibles.

ك. طوق منع التسرّب Gaskets.

ل. نماذج السباكة Foundry Patterns .

3) ماهي البيانات التي يمكن الحصول عليها بواسطة تحليل الفشل.

الفصل الثاني
اختيار المواد بالنسبة للخواص
Materials Selection for properties

الفصل الثاني
اختيار المواد بالنسبة للخواص

1.2 مقدمة Introduction

هناك عدد من الأسئلة التي نحتاج الى الإجابة عليها قبل إتخاذ القرار حول المواصفة المطلوبة للمادة و بالتالي القرار حول المادة المثلى Optimum Material. ويمكن تصنيف هذه الأسئلة الى أربعة مجاميع رئيسية:

1. ما هي الخواص المطلوبة؟

2. ما هي متطلبات طريقة التصنيع (أو المعالجة) Processing؟

3. ما هي درجة توفّر المواد؟ Availability

4. ما هي الكلفة Cost؟

وفيما يلي نبين نوع الأسئلة التي تؤخذ بنظر الإعتبار عند محاولة الوصول الى الإجوبة حول الأسئلة العامة أعلاه.

الخواص Properties

1. ماهي الخواص الميكانيكية المطلوبة؟ هذا يعني دراسة الخواص مثل، المقاومة Strength ، مقاومة Toughness، المتانة Ductility، المطيلية Hardness، الصلادة Stiffness الجساءة (الصلابة) ...الخ. ويدمج مع هذا السؤال، سؤال Wear Resistance، مقاومة البلى Fatigue Resistance الكلال آخر يتضمن، هل أن الخواص المطلوبة عند درجات حرارية منخفضة، أم عند درجة حرارة الغرفة، أم عند درجات حرارية عالية؟

2. ماهي الخواص الكيمياوية المطلوبة؟ و هذا يعني دراسة الوسط أو المحيط الذي سوف تتعرض له المادة و إمكانية حدوث التآكل Corrosion.

3. ماهي الخواص الحرارية المطلوبة؟ حيث يتضمن دراسة الخواص مثل السعة الحرارية النوعية Specific Heat Capacity، المعامل الخطي للتمدد الحراري Expansion Linear Coefficient of Thermal، و الموصلية الحرارية Thermal Conductivity.

4. ماهي الخواص الكهربائية المطلوبة؟ على سبيل المثال، هل أن المادة المطلوبة، يجب ان تتميز بموصلية كهربائية Conductor أم عازلة Insulator؟

5. ماهي الخواص المغناطيسية المطلوبة؟ على سبيل المثال، هل أن المادة المطلوبة يجب أن تتميز بخواص مغناطيسية موقتة Soft Magnetic أم خواص مغناطيسية دائمة Hard Magnetic أم خواص لامغناطيسية Non-Magnetic؟

6. ماهي الشروط البعدية المطلوبة Dimensional Conditions؟ على سبيل المثال، هل أن المادة المطلوبة يجب أن تتميز بقابلية عالية عل الإنهاء السطحي الجيد Good Surface Finish، لها إستقرارية بعدية Dimensional Stability، لها حجم معين...الخ، يجب ان تكون مسطحة Flat.

عوامل طريقة التصنيع (المعالجة) Processing Parameters

1. هل هناك أي شروط خاصة لطريقة التصنيع أو المعالجة تحد من إختيار المادة؟ على سبيل المثال، هل أن المادة المطلوبة يجب أن تكون مسبوكة (مصبوبة) Cast أم مبثوقة (مشكّلة) Extruded ؟

2. هل هناك أي شروط حول معاملة المادة Material Treatment؟ على سبيل المثال، هل أن المادة يجب أن تكون ملدّنة Annealed أم مصلدة محلولياً Solution Hardened؟

3. هل هناك أي شروط خاصة حول إستخدام العدة Tooling Requirements؟ على سبيل المثال، هل أن الصلادة المطلوبة للمادة تتطلب إستخدام عدد قطع خاصة Cutting Tools؟

درجة التوفّر **Availability**

1. هل أن المادة متوفرة بشكل يمكن الحصول عليها بسهولة؟ على سبيل المثال، هل أن المادة متوفرة في المخازن أم يمكن الحصول عليها بصور سريعة من المجهّز الطبيعي Normal Suppliers؟

2. هل هناك مشاكل حول تجهيز المادة؟ هل أن المادة متوفرة فقط من المجهّز الخاص Special Suppliers؟ هل أن الكمية المتوفرة قليلة جداً؟

3. ماهو شكل المادة المجهّزة؟ على سبيل المثال، هل أن المادة تجهّز عادة بشكل قضبان Bars، أم بشكل ألواح Sheets؟ حيث ان ذلك يمكن ان يؤثر على طريقة التصنيع المستخدمة.

الكلفة Cost

1. ماهي كلفة المادة الأولية (الخام) Raw Material؟ على سبيل المثال، هل يمكن إستخدام المادة المنخفضة الكلفة Cheaper Material.

2. ماهي الكمية المطلوبة؟ على سبيل المثال، ماهي كمية المنتج المطلوبة لكل إسبوع، لكل شهر، لكل سنة؟

3. ماهي كلفة شروط العملية أو طريقة التصنيع؟ هل أن العملية تتطلب إنفاق أولي Initial Expenditure عالية ام منخفضة؟ هل أن طريقة التصنيع تتطلب إستخدام أيدي عاملة ماهرة Skilled Labour؟ هل أن تكاليف التشغيل Running Costs عالية؟ ذات كلفة عالية؟

4. ماهي كلفة المخالفات Penalties Cost بالنسبة للإفراط في المواصفة Overspecification؟ على سبيل المثال، إذا كانت المادة أقوى من المطلوب هل أن ذلك يؤدي الى زيادة الكلفة؟ إذا كان المنتج يصنّع بدرجة نوعية أعلى من المطلوب هل ان ذلك يؤثر على الكلفة؟ و كم ستكون كلفة المادة المصنّعة Processed Material؟

في هذا الفصل سوف ندرس الأسئلة أعلاه، و التي تتعلق بإختيار المادة بالإعتماد على الخواص.

1.2 الإختيار بالنسبة للمقاومة الساكنة

Selection for Static Strength

يمكن تعريف المقاومة الساكنة Static Strength ، بأنها قابلية المادة على مقاومة الحمل المستقر القصير الأمد عند درجات حرارية معتدلة من دون حدوث الإنكسار Breaking أو التفتيت Crushing. أو حدوث التشوهات الكبيرة. فعندما يخضع الجزء الى إجهاد أحادي المحور Universal Stress، فإن إجهاد الخضوع Yield Stress، يؤخذ كمقياس لمقاومة المادة اذا كانت المادة مطيلية Ductile كمقياس لمقاومة المادة إذا Tensile Strength، بينما تؤخذ مقاومة الشد كانت المادة هشة Brittle. من هنا، فإن مقاييس المقاومة الساكنة Measures of Static Strength:هي

1. Yield Strength. مقاومة الخضوع
2. Proof Stress. إجهاد الصمود
3. Tensile Strength. مقاومة الشد
4. Compression Strength. مقاومة الضغط
5. Hardness. الصلادة أي الصلادة المرتبطة مع مقاومة الشد للمادة.

أما عندما يخضع الجزء الى إجهادات ثنائية أو ثلاثية المحاور Biaxial or Triaxial Stresses، على سبيل المثال، جدار Shell يخضع الى ضغط داخلي Internal Pressure، فإن هناك عدد من النظريات التي يمكن إستخدامها للتنبأ بفشل المادة Material Failure. إن نظرية الإجهاد الرئيسي الأقصى Maximum Principal Stress، التي تستخدم في حالة المواد الهشة Brittle Materials، تتنبأ بالفشل عندما يحدث، عندما تصل قيمة الإجهاد الرئيسي الأقصى الى قيمة

مساوية لقيمة إجهاد الشد، أو قيمة إجهاد حد المرونة Elastic Limit، في حالة المادة التي تخضع الى إجهاد الشد البسيط Simple Tension.

أما نظرية إجهاد القص الأقصى Maximum Shear Stress، التي تستخدم في حالة المواد المطيلية Ductile Materials، فإنها تتنبأ بحدوث الفشل عندما تصل قيمة إجهاد القص الأقصى في حالة الإجهاد الثنائي أو الثلاثي المحاور الى قيمة مساوية لقيمة إجهاد القص القصوى للمادة عند حد المرونة في حالة الشد البسيط. و في حالة الإجهاد الثنائي المحور، فإن هذا يحدث عندما يكون الفرق مابين إثنين من الإجهادات الرئيسية مساوياً الى إجهاد حد المرونة.

النظرية الأخرى، التي تستخدم مع المواد المطيلية تنص على أن الفشل يحدث عندما تكون طاقة الإنفعال لكل وحدة حجم Strain Energy per Unit Volume مساوية الى طاقة الإنفعال عند حد المرونة في حالة الشد البسيط. و يجب التأكيد، على أن شرط المقاومة في الجزء لا يتطلب دراسة المقاومة الساكنة فحسب، بل التصميم أيضاً، من هنا، الإنحناء Bending يكون أكثر كفاءة في حالة العتبة التي تكون على شكل حرف I (I-Beam) من العتبة التي يكون مقطعها العرضي مستطيلاً، لأنه المادة في العتبة تركز عند السطوح العليا و السفلية حيث تكون قيم الإجهادات عالية، و لاتخضع الى التلف في المناطق التي تكون فيها قيم الإجهادات منخفضة. إن الطبقات الرقيقة Thin Shell or Skins يمكن ان تقوّى بواسطة إضافة الأشرطة الداعمة Ribs أو الأشرطة المموجة Corrugations.

إن الخواص الميكانيكية، بالنسبة لأغلب المواد المطيلية المطروقة Ductile Wrought Materials، في حالة الإنضغاط Compression تكون مقاربة بشكل كبير للخواص في حالة الشد Tension بالنسبة لخواص الشد المستخدمة كمقياس للمقاومة في حالتي الشد و الإنضغاط. أما بالنسبة للمعادن في الحالة

المصبوبة Cast Conditions، فإنها يمكن ان تكون أقوى في الإنضغاط منها في حالة الشد. إن المواد الهشة، مثل المواد السيراميكية، تكون بصورة عامة أقوى في حالة الإنضغاط من حالة الشد. و هناك بعض المواد التي تكون فيها خاصية الإتجاهية Anisotropy مهمة أي الخواص تعتمد على الإتجاه الذي يتم فيه القياس. و هذا يمكن ملاحظته في المواد المطروقة على سبيل المثال، حيث تكون هناك مكتنفات أو متضمنات مستطيلة Elongated Inclusion، و طريقة التشكيل تجعلها موجّه بنفس الإتجاه. أو في حالة المواد المركبة Composite Materials الحاوية على ألياف أحادية الإتجاه Unidirectional Fibres.

إن الخواص الميكانيكية للمعادن تتأثر بصورة كبيرة جداً بالمعاملة التي تخضع لها سواء كانت تلك المعاملة هي معاملة حرارية Heat Treatment أو معاملة تشكيل Working Treatment. وعليه، فإنه من غير الممكن أن نقارن السبائك بشيء غير مقاومة الشد. إن خواص المواد البوليمرية Polymeric Materials متأثرة بشكل كبير جداً بالمواد المضافة Additives الممزوجة مع المواد الخام خلال عملية تصنيعها و عليه، فقط مقارنة الخواص الميكانيكية للبوليمرات المختلفة تكون ممكنة. و هناك، أيضاً مشكلة في حالة اللدائن اللدنة حرارياً Thermoplastic، حيث أنها حتى عند $20^{o}C$، يمكن أن تخضع الى زحف كبير، و هذا يزداد مع زيادة درجات الحرارة.

أي أن مقاومتها تعتمد بشكل كبير على الزمن Time-Dependent. إن اللدائن اللدنة حرارياً الغير مقواة Unreinforced لها مقاومة منخفضة مقارنة مع أغلب المعادن، الإ أن كثافتها المنخفضة تكون مفضلة أي أنها تتميز بنسبة مقاومة/وزن مفضلة.

الجدول 1.2 يبين مقارنة عامة، لمقاومة الشد بالنسبة لمدى واسع من المواد. إن جميع البيانات المشار إليها في الجدول كانت عند درجات حرارية

بحدود 20^oC. أما الجدول 2.2 ، فإنه يبين مقارنة عامة لمقاومة الشد النوعية Specific Strength أي مقاومة الشد مقسومة على الكثافة. و ذلك للحصول على مقياس المقاومة لكل وحدة كتلة Strength per Unit Mass. الجدول 33. يبين سبائك الفولاذ المستخدمة بشكل شائع عند مستويات مختلفة من مقاومة الشد، ونلاحظ في الجدول إستخدام محدّد تسطير المقطع Limiting Ruling Section، إن محدد تسطير المقطع هو أقصى قطر للقضيب الدائري المقطع عند المركز الذي فيه يمكن الحصول على الخواص النوعية Specific Properties. و سبب ذلك، هو أنه،خلال المعاملة الحرارية Heat Treatment، تحدث معدلات مختلفة من التبريد عند مراكز القضبان، أو عند أي مقطع عرضي، نتيجة الفرق في الحجوم، و هذا بدوره يؤثر على التركيب المجهري Microstructure الذي يمكن الحصول عليه بواسطة المعاملة الحرارية.

Strength(Mpa)	Material
<10	Polymers Foams
2 to 12	Woods perpendicular to the grain
2 to 12	Elastomers
6 to 100	Wood Parallel to the grain
60 to 100	Engineering Polymers
20 to 60	Concrete
20 to 60	Lead Alloys
80 to 300	Magnesium Alloys
160 to 400	Zinc Alloys
100 to 600	Aluminium Alloys
80 to 1000	Copper Alloys
250 to 1300	Carbon and Low Alloy-Steels
250 to 1500	Nickel Alloys
500 to 1800	High-Alloy Steels
100 to 1800	Engineering Composite
1000 to > 10000	Engineering Ceramics

الجدول1.2

المواد الهندسية طبقاً لمقاومتها

Material	Density (Mg/m^3)	Strength to Weight Ratio ($Mpa/Mg\ m^{-3}$)
Aluminum alloys	2.6 to 2.9	40 to 220
Copper alloys	7.5 to 9.0	8 to 110
Lead alloys	8.9 to 11.3	1 to 3
Magnesium alloys	1.9	40 to 160
Nickel alloys	7.8 to 9.2	30 to 170
Titanium alloys	4.3 to 5.1	40 to 260
Zinc alloys	5.2 to 7.2	30 to 60
Carbon and low alloy steel	7.8	30 to 170
High-alloy steels	7.8 to 8.1	60 to 220
Engineering ceramics	2.2 to 3.9	>300
Glasses	2 to 3	200 to 800
Thermoplastics	0.9 to 1.6	15 to 70
Polymer foams	0.04 to 0.7	0.4 to 12
Engineering composite	1.4 to 2	70 to 900
Concrete	2.4 to 2.5	8 to 30
Wood	0.4-1.8	5 to 60

الجدول2.2

المقاومة النوعية specific strength عند 20 °C.

Tensile Strength (Mpa)	BS steel code	Description of steel	Limiting ruling section (mm)
620 to 770	080M40	Medium carbon steel, hardened and tempered	63
	150M36	Carbon-Mn steel, hardened and tempered	150
	503M40	1%Ni steel,hardened and tempered	250
700 to 850	150M36	1.5% manganese steel,hardened and tempered	63
	708M40	1%Cr-Mo-steel,hardened and tempered	150
	605M36	1.5%Mn-Mosteel,hardened and tempered	250
770 to 930	708M40	1%Cr-Mosteel,hardened and tempered	100
	817M40	1.5%Ni-Cr-Mo steel,hardened and tempered	250
850 to 1000	630M40	1%Cr-steel,hardened and tempered	63
	709M40	1%Cr-Mosteel,hardened and tempered	100
	817M40	1.5%Ni-Cr-Mo steel,hardened and tempered	250
930 to 1080	709M40	1.5%Cr-Mo steel,hardened and tempered	63
	817M40	1.5%Ni-Cr-Mo steel,hardened and tempered	100
	826M31	2.5%Ni-Cr-Mo steel,hardened and tempered	250
1000 to 1150	817M40	1%Ni-Cr-Mo steel,hardened and tempered	63
	826M31	2.5%Ni-Cr-Mo steel,hardened and tempered	150
1080 to 1240	826M31	2.5%Ni-Cr-Mo steel,hardened and tempered	100
	826M40	2.5%Ni-Cr-Mo steel,hardened and tempered	250
1150 to 1300	826M40	2.5%Ni-Cr-Mo steel,hardened and tempered	150
1240 to 1400	826M40	2.5%Ni-Cr-Mo steel,hardened and tempered	150
>1540	835M30	4%Ni-Cr-Mo steel,hardened and tempered	150

الجدول3.2

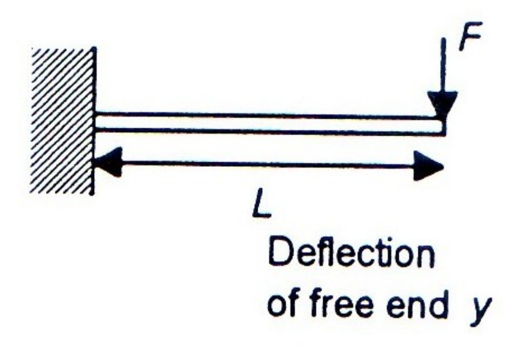
إختيار الفولاذ

3.2 الإختيار بالنسبة للجساءة (الصلابة) Selection for Stiffness

الجساءة يمكن أن تعرّف بأنها قابلية المادة على مقاومة الإنحناء أو الإنحراف Deflection عندما تخضع الى الحمل. فإذا فرضنا أن لدينا عتبة كابولية Cantilever Beam

$$y = \frac{FL^3}{3EI} \qquad [1]$$

مثبتة من طرف واحد، طولها (L) و تخضع الى الحمل (F) في الطرف الحر (الشكل 12.)، فإن الإنحراف (y) عند الطرف الحر يمكن حسابها من العلاقة التالية :



الشكل 1.2
العتبة الكابولية .

حيث أن:

E = معامل الشد Tensile Modulus.

I = العزم الثاني لمساحة المقطع العرضي للعينة بالنسبة الى محور التعادل Second Moment of Area of the Beam Cross Section with Respect to the neutral Axis.

من هنا، بالنسبة للعتبة الكابولية ذات الشكل و الطول المعين، كلما يكون معامل الشد (E) عالياً كلما يكون الإنحراف (y) صغيراً. و هناك علاقات مشابهة بالنسبة للأشكال الأخرى من العتبة. و بصورة عامة، كلما يكون معامل الشد عالياً، كلما تكون الجساءة عالية. إن إنحراف العتبة هو دالة لكل من (E) و (I). و عليه، بالنسبة للمادة، فإن العتبة يمكن أن تكون أكثر جساءة بواسطة زيادة قيمة (I). و هذا يمكن تحقيقه، بواسطة وضع أكبر كمية ممكنة من المادة بحيث تكون بعيدة قدر الإمكان عن محور الإنحناء Bending-Axis . و لهذا، المقطع بشكل حرف (I) يكون عادة إسلوب فعّال لتحقيق الجساءة المطلوبة. و بشكل مشابه، الأنبوب Tube يكون أكثر كفاءةً من القضيب المصمت (الغير مجوف) Solid Rod.

الحالة الأخرى، التي ترتبط بالقيمة (EI) هي الإنبعاج Buckling للأعمدة عندما تخضع الى الأحمال الضغطية Compression Loads. إن المعادلة القياسية المستخدمة للإنبعاج الذي يحدث في العمود الذي طوله (L) و يخضع الى حمل مقداره (F) هي:

$$F = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \qquad [2]$$

و تسمى هذه المعادلة، معادلة أويلر Euler’s Equation. و كلما تكون قيمة (EI) عالية كلما يكون الحمل المطلوب لحدوث الإنبعاج (F) عالياً. من هنا، يمكن القول، بأن جساءة العمود تكون عالية كلما تكون قيمة (EI) عالية. و نلاحظ بأن الأعمدة القصيرة والغليظة Stubby تكون أكثر إحتمالاً للخضوع الى الفشل بواسطة الكسر عندما تتجاوز قيمة إجهاد الخضوع قيمة الإنبعاج. و بصورة عامة، الإنبعاج يمثل إسلوب الفشل Failure Mode الأكثر إحتمالاً عندما يكون العمود رفيعاً Slender.

إن معامل الشد Tensile Modulus للمعادن يتأثر بشكل ضئيل بواسطة التغيرات في تراكيبها الكيمياوية Composition أو معاملاتها الحرارية Heat treatment. أما بالنسبة للمواد المركبة Composite Materials، فإن معامل الشد يتأثر بشكل كبير بواسطة التغيرات في إتجاه الإلياف و كذلك الكميات النسبية للمكونات. الجدول 4.2 يبين قيم معامل الشد النموذجية للمواد عند درجات حرارية بحدود $20^{o}C$.

Tensile Modulus (Gpa)	Material
<0.2	Polymer foams
<0.2	Elastomers
0.2 to 10	Woods parallel to grain
0.2 to 10	Engineering Polymers
2 to 20	Woods perpendicular to grain
10 to 11	Lead alloys
20 to 50	Concrete
40 to 45	Magnesium alloys
50 to 80	Glasses
70 to 80	Aluminium alloys
43 to 96	Zinc alloys
110 to 125	Titanium alloys
100 to 160	Copper alloys
200 to 210	Steels
80 to 1000	Engineering Ceramics

الجدول4.2

4.2 **المواد طيقاً معامل الشد.**

الإختيار بالنسبة لمقاومة الكلال

Selection for Fatigue Resistance

إن فشل الجزء الذي يخضع الى حمل متراوح Fluctuating Loads هو نتيجة الشقوق التي تنشأ في مناطق عدم الإستمرارية Discontinuity في المادة و من ثم تنمو حتى حدوث الفشل. إن العوامل الرئيسية التي تؤثر على خواص الكلال هي:

- تركيز الإجهادات Stress Concentration الذي يتأثر بتصميم الجزء.
- التآكل Corrosion.
- الإجهادات المتبقية Residual Stresses.
- الإنهاء السطحي Surface Finish.
- درجة الحرارة Temperature.

- التركيب المجهري للسبيكة Microstructure of Alloy.

بصورة عامة، بالنسبة للمعادن، فإن حد التحمّل Endurance Limit أو حد الكلال Fatigue Limit عند حوالى (10^8-10^7) دورة يقع مابين ثلث و نصف مقاومة الشد الساكنة Static Strength. و بالنسبة لسبائك الفولاذ، فإن حد الكلال يتراوح مابين (0.50-0.4.) من المقاومة الساكنة. إن وجود الشوائب في الفولاذ مثل الكبريت أو الرصاص التي تؤدي الى تحسين قابلية التشغيل Machinability، يمكن أن تؤدي في نفس الوقت الى خفض حد الكلال. أما بالنسبة لحديد الزهر الرمادي Grey Cast Iron، فإن حد الكلال هو حوالي 40. من المقاومة الساكنة. أما سبائك حديد الزهر القابلة للطرق Malleable و العقدية Nodular فإنها تقع في المدى 50. بالنسبة للاصناف الفرايتية Ferritic و 30. بالنسبة للأصناف البيرلايتية Pearlitic العالية المقاومة. و بالنسبة لسبائك حديد الزهر الأسود القلب Blackheart، و الأبيض القلب Whiteheart و البيرلاتية المنخفضة المقاومة تكون حوالي 40. من المقاومة الساكنة. أما سبائك الألمنيوم، فإن حد التحمّل يتراوح مابين (0.40-0.3.) من المقاومة الساكنة. وبالنسبة لسبائك النحاس يتراوح مابين (0.50-0.4.).

إن تأثيرات الكلال في حالة البوليمرات، تتعقد من خلال الحقيقة التي تنص على أن الأحمال المتناوبة Alternating Loads تؤدي الى تسخين البوليمر. و هذا يؤدي بدوره الى خفض معامل المرونة Elastic Modulus و عند ترددات عالية يمكن أن تؤدي الى حدوث الفشل. من هنا، الكلال في البوليمرات يتأثر بشكل كبير جداً بعامل التردد أو التكرار Frequency.

5.2 الإختيار بالنسبة للمتانة Selection for Toughness

يمكن تعريف المتانة بأنها المقاومة التي تبديها المادة ضد الكسر. أي أن المادة المتينة Tough Material تقاوم تولد الشق Crack Propagation. و يمكن دراسة مقياس المتانة من خلال نوعين من المقاييس الرئيسية:

Izod أو آيزود 1Charpy) مقاومة المادة لتحميل الصدمة، التي تقاس بواسطة إختبارات جاربي بواسطة كمية الطاقة المطلوبة لكسر عينة الإختبار و كلما كانت الطاقة عالية كلما كانت المادة أكثر مطيلية.

، و هذه 2Fracture Toughness) مقاومة المادة لنمو الشق الموجود في عينة إختبار متانة الكسر . و كلما تكون (K_{IC}) Plain Strain Fracture Toughnessتحدّد من خلال متانة كسر الإنفعال البسيط يبين بعض القيم النموذجية لمتانة كسر الإنفعال 5. صغيرة كلما تكون المادة أقل متانة. الجدول 2(K_{IC}) قيمة البسيط (K_{IC})20 عند ^{o}C .

Plain Strain Fracture Toghness (MN $m^{-3/2}$)	Material
<1.0	Polymer foams
0.07 to 0.9	Woods perpendicular to grain
0.1 to 0.3	Concrete
0.3 to 0.6	Glasses
0.5 to 10	Engineering polymers
1 to 10	Woods parallel to the grain
2 to 10	Engineering ceramics
7 to 11	Cast irons
10 to 11	Magnesium alloys
10 to 60	Aluminum alloys
10 to 100	Engineering composite
20 to 150	Steels
50 to 110	Copper alloys
60 to 110	Titanium alloys
60 to 110	Nickel alloys

الجدول5.2
القيم النموذجية لمتانة كسر الإنفعال البسيط

و يلاحظ وجود علاقة عكسية مابين إجهاد الخضوع Yield Stress و المتانة في السبيكة المعدنية، أي كلما يكون إجهاد الخضوع عالياً، كلما تكون المتانة منخفضة. على سبيل المثال، مقاومة الخضوع لسبائك الفولاذ المنخفضة السبائكية المقساة و المراجعة Low Alloy Quenched and Tempered، يمكن زيادتها بواسطة الأساليب الميتالورجية و لكن على حساب الإنخفاض في قيمة المتانة. حيث أن سبائك الفولاذ تصبح أقل متانة مع زيادة المحتوى الكاربوني Carbon Content و خشونة الحجم الحبيبي، أي زيادة الحجم الحبيبي (حجم حبيبي كبير Large Grain Size).

أما بالنسبة للدائن Plastics، فيمكن تحسين متانتها بواسطة إضافة المطاط Rubber، أو البوليمر المتين Tough Polymer، أو بواسطة البلمرة المشتركة Copolymerisation أو إضافة الألياف المتينة Tough Fibres، على سبيل المثال، مادة الأستيرين أكري لو نترايل Styrene-Acrylonitrile (ASN)، التي تتميز بالهشاشية و المتانة المنخفضة جداً، يمكن زيادة متانتها بواسطة إستخدام مطاط البولي بيوتادين Polybutadiene Rubber و ذلك للحصول على مادة الأكري لونترايل-بيوتادين-إستيرين المتينة Tough Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS).

6.2 الإختيار بالنسبة للزحف و مقاومة درجة الحرارة

Selection for Creep and Temperature Resistance

يمكن تحسين مقاومة الزحف للمعدن بواسطة إضافة الدقائق الناعمة المشتتة في الأرضية المعدنية، وذلك لإعاقة حركة الإنخلاعات Dislocations.

إن سلسلة سبائك النيمونك Nimonic Alloys Series ذات أساس 80 Ni-Cr /20 Alloy لها مقاومة زحف جيدة، نتيجة وجود الدقائق الناعمة المشتتة التي تتكون بواسطة إضافة كميات صغيرة من التيتانيوم Ti، الألمنيوم Al، الكاربون C أو العناصر الأخرى. إن الزحف يزداد مع مع زيادة درجة الحرارة، من هنا، يعتبر الزحف العامل الأساسي في تحديد الدرجة التي تستخدم عندها المادة. أما، العامل الآخر، فهو تأثّر المادة بالجو المحيط، حيث أن هذا العامل يمكن أن يؤدي الى تآكل السطح و الإنخفاض التدريجي في مساحة المقطع العرضي للجزء و بالتالي التأثير على قابلية تحمّل الأحمال أو القوى المسلّطة. إن هذه التأثيرات تزداد مع زيادة درجة الحرارة. إن سلسلة سبائك النيمونك تتميز بمقاومة جيدة ضد هذه التأُثيرات. حيث يمكن إستخدامها عند درجات حرارية تصل الى ^{o}C900.

بصورة عامة، في معظم المعادن يكون تأثير الزحف كبيراً، عند درجات الحرارة العالية. أما في اللدائن، فإن الزحف يكون ذات تأثير كبير جداً عند درجة حرارة الغرفة. وبصورة عامة، اللدائن المصلّدة حرارياً Thermosets لها مقاومة درجة حرارة أعلى من اللدائن اللدنة حرارياً Thermoplastics. و على الرغم من ذلك، فإن إضافة كميات مناسبة من الحشوات Fillers و الألياف يمكن أن يحسّن من خواص مقاومة درجة الحرارة بالنسبة للدائن اللدنة حرارياً.
الجدول 62. يبين حدود درجات الحرارة النموذجية، لمدى واسع من المواد الهندسية.

الجدول 2.6 حدود درجات الحرارة النموذجية لبعض المواد الهندسية .

Temperature Limit (^{o}C)	Material
Room temp. to 150	1-Few thermoplastic are recommended for prolonged use above 100^{o}C. 2-Glass-filled nylon can, be used up to 150^{o}C. 3-The only engineering metal which has limits within this range is Lead.
150 to 400	1-Magnesium and aluminium alloys can ingeneral only be used up to about 200^{o}C, though some specific alloys can be used to higher temperature . For example , the aluminium alloy LM13 (AA336.0) is used for pistons in engines and experience temperature (200-250^{o}C). 2-Some cast aluminium bronzes can be used up to about 400^{o}C. 3-Wrought aluminium bronzes can be used up to about 300^{o}C. 4-Plain carbon and manganse-carbon steels are widely used for temperatures in this range.
400 to 600	1-Plain carbon and manganse-carbon steels cannot be used above 400-450^{o}C. 2-Low alloy steels can be used in this range. 3-For temperatures up to about 500^{o}C a carbon-0.5%Mo steel might be used. 4-Up to about 525^{o}C a 1%Cr-0.5%Mo steel can be used. 5-Up to about 550^{o}C a 0.5%Cr-Mo-V steel can be used. 6-Up to about 600^{o}C a steel with 5 to 12%Cr can be used. 7-Titanium allos are widely used in this temperature range. Examples: 1-Alpha-beta alloy 6%Al-4%V (IMI318) is used up to 450^{o}C. 2-Near alpha alloys can be used to higher temperatures,e.g. the alloy (IMI829) is used up to about 600^{o}C.
600 to 1000	1- Metals most widely used in this range are the austenitic stainless steel , Ni-Cr and Ni-Cr-Fe alloys , and cobalt base alloys. 2- Austenitic stainless steel with 18%Cr-8%Ni can be used up to about 750^{o}C. 3-Nimomic series alloys such as Nimonic 90 can be used up to about 900^{o}C, Nimonic 901 can be used up to about 1000^{o}C. 4-Ni-Cr-Fe alloys , such as Inconel , Incoloy series , for example, inconel600 can be used up to 1000^{o}C and Incoloy 800H to 700^{o}C.
Above 1000	1-The Refractory metals , i.e. Mo,Nb,Ta,W, and ceramics. 2-The refractory metals and their alloys can be used in excess of 1500^{o}C. 3-Alumina is used in furnaces up to about 1600^{o}C. 4-Silicon nitride can be used up to about 1200^{o}C. 5-Silicon carbide can be used up to about 1500^{o}C.

الجدول6.2
حدود درجات الحرارة النموذجية لبعض المواد الهندسية.

7.2 الإختيار بالنسبة لمقاومة التآكل

Selection for Corrosion Resistance

إن العامل الأكثر أهمية في تحديد إحتمالية حدوث الهجوم التآكلي Corrosion Attack بالنسبة للمعادن التي تخضع للتآكل الجوي Atmospheric Corrosion هو وجود الإلكتروليت المائي Aqueous Electrolyte. وهذا الإلكتروليت يمكن أن يتكون بواسطة تكاثف الرطوبة التي تتواجد نتيجة الظروف المناخية. إن كمية التلوث في الجو يمكن أن تؤثر أيضاً على معدل التآكل. و يمكن خفض معدل التآكل من خلال الإختيار المناسب للمواد. فبالنسبة للمعادن المغمورة في الماء، يعتمد التآكل على المواد التي تذوب في الماء.

إن سبائك الفولاذ الكاربوني Carbon Steels و سبائك الفولاذ المنخفض السبائكية Low Alloy Steel تعاني عادة من التآكل حيث يلاحظ حدوث التآكل فيها بشكل صدأ Rust. كما أن هذه السبائك تتميز بمقاومة تآكل ضعيفة في الأجواء الصناعية Industrial Atmosphere، و الماء العذب (الغير مالح) Fresh Water، وماء البحر Sea Water. إن طلاء الحماية Protective Coating للسطح يمكن أن يخفض من معدل التآكل في هذه السبائك. حيث أن إضافة الكروم الى الفولاذ يحسّن بشكل كبير من مقاومة التآكل. ولهذا، سبائك الفولاذ الحاوية على (4-6%Cr) تتميز بمقاومة جيدة في الأجواء الصناعية، ماء البحر، و الماء العذب. بينما سبائك الفولاذ المقاوم للصدأ لها مقاومة فائقة في الأجواء الصناعية، والماء العذب إلا أنها تعاني من بعض التآكل في ماء البحر.

إن مقاومة التآكل لحديد الزهر الرمادي Grey Cast Iron أيضاً جيدة في الأجواء الصناعية إلا أنها، غير جيدة في ماء البحر و الماء العذب على الرغم من أنها أفضل من هذه الناحية من من سبائك الفولاذ الكاربوني الصرف Plain Carbon Steels. إن النحاس المعرّض للهواء تتكون فيه عادة طبقة حماية

خضراء Protective Green Layer التي تحميه من هجوم التآكل. و لهذا يتميز بمقاومة تآكل جيدة. كما أنه يتميز بمقاومة تآكل جيدة في الماء العذب و ماء البحر. من هنا، نلاحظ الإستخدام الواسع للنحاس في تصنيع شبكة الأنابيب Piping المستخدمة في أنظمة توزيع الماء Water Distributing Systems وأنظمة التسخين المركزي Central Heating Systems . سبائك النحاس، تتميز بمقاومة تآكل جيدة في الأجواء الصناعية، ماء البحر، و الماء،على الرغم من حدوث ظاهرة إزالة المعدن Demetallification التي يمكن أن تحدث في بعض سبائك النحاس، مثل إزالة الخارصين Dezincification في سبيكة البراص الحاوية على أكثر من %Zn15.

إن النيكل و سبائكه، أيضاً يتميز بمقاومة عالية للتآكل في الجو الصناعي، الماء العذب، و ماء البحر. أما بالنسبة للتيتانيوم و سبائكه فإنها تتميز بمقاومة فائقة للتآكل و ربما مقاومة أفضل من جميع المعادن في الأجواء الصناعية، ماء البحر، و الماء الماء العذب، من هنا يستخدم بشكل واسع في التطبيقات التي تعاني من مشكلة التآكل.

إن اللدائن Plastics لا تخضع الى التآكل كماهو الحال بالنسبة للمعادن. و هي بصورة عامة تتميز بمقاومة تآكل فائقة. من هنا، نلاحظ الإستخدام الواسع للدائن في تصنيع الأنابيب اللدائنية المستخدمة في نقل الماء و المواد الكيمياوية الأخرى. وجدير بالذكر، بأن البوليمرات تخضع الى التحلل عندما عندما تتعرض الى الأشعة فوق البنفسجية Ultraviolet Radiation، على سبيل المثال، الأشعة الناتجة من أشعة الشمس، الإجهادات الحرارية. و المثال التالي يوضّح ذلك.

مثال12.

وضّح لماذا تخضع البوليمرات الى التحلّل عندما تتعرض الى الضوء ما فوق البنفسجي Ultraviolet Light؟ علماً أن طاقة الآصرة C-C هي 370 KJ/mole و أن الطول الموجي للضوء مافوق البنفسجي UV هو $3200 A^o$ و ثابت بلانك Plank's Constant(h) هو 0.662×10^{-33} J.s..

الحل

بإستخدام النظرية الكمية Quantum Theory فإن:

$$\text{Using Quantum Theory :}$$

$$\text{The of a Photon E} = hv = \frac{hc}{\lambda}$$

$$= \frac{0.662\times10^{-33}\times3\times10^{8}}{3200\times10^{-10}} = 6.2\times10^{-19}\ \text{Joules}.$$

$$\text{The Energy of a C - C Bond}$$

$$= \frac{370000}{6.02\times10^{23}} = 6.1\times10^{-19}\ \text{Joules}.$$

من هنا، طاقة فوتون الضوء مافوق البنفسجي يكون تقريباً مساوياً الى طاقة الآصرة الكاربونية. و لهذا، فإن الآصرة يمكن ان تخضع الى الانكسار عندما يتم إمتصاص الفوتون. و لهذا تخضع البوليمرات الى التحلّل عند تعرضها الى ضوء الأشعة مافوق البنفسجية UV-Light. و لخفض هذه التأثيرات تضاف عادة مواد بشكل حشوات Fillers خلال عملية تصنيع المادة اللدائنية.

أما المواد السيراميكية فإن، أغلبها تبدي مقاومة فائقة للتآكل، فالزجاج عادة يكون مستقراً و مقاوماً لهجوم التآكل. من هنا، نجد الإستخدام الواسع للزجاج في تصنيع الحاويات Containers. أضف الى ذلك، المينا Enamels المصنعة من زجاج السيليكات Silicates و زجاج سليلكات البورون Borosilicates تستخدم بشكل واسع كمادة طلاء لحماية كل من سبائك الفولاذ و سبائك حديد الزهر من هجوم التآكل. الجدول 7.2، يبين دليل تقريبي حول مقاومة التآكل للمواد في الأوساط المختلفة.

الجدول 2.7 مقاومة التآكل للمواد في الأوساط المختلفة .

Corrosion Resistance	Material
Aerated water	
High resistance	All ceramics, glasses, lead alloys, alloy steels, titanium alloys, nickel alloys, copper alloys, PTFE, polypropylene,nylon, epoxies, polystyrene, PVC,
Medium resistance	Aluminium alloys, polythene, polyesters.
Low resistance	Carbon steels.
Salt water	
High resistance	All ceramics, glasses, lead alloys,stainless steels, titaniumalloys, nickel alloys, copper alloys, PTFE, polypropylene,nylon, epoxies, polystyrene, PVC, polythene.
Medium resistance	Aluminium alloys, polyesters.
Low resistance	Low-alloy steels, carbon steels.
UV radiation	
High resistance	All ceramics, glasses, all alloys.
Medium resistance	Epoxies, polyesters, polypropylene, polystyrene, HD polyethylene, polymers with UV inhibitors.
Low resistance	Nylon, PVC, many elastomers.
Strong acids	
High resistance	Glasses, alumina, silicon carbides, silica, PTFE, PVC, polythene, epoxies, elastomers, lead alloys, titanium alloys, nickel alloys, stainless steels .
Medium resistance	Magnesium oxide, aluminium alloys.
Low resistance	Carbon steels, polystyrene, polyurethane, nylon, polyesters.
Strong alkalis	
High resistance	Alumina, nickel alloys, steels, titanium alloys,nylon, polythene, polystyrene, PTFE, PVC, polypropylene, epoxies.
Medium resistance	Silicon carbides, copper alloys, zinc alloys, elastomers,polyesters.
Low resistance	Glasses, aluminium alloys.
Organic solvents	
High resistance	All ceramics, glasses , all alloys, PTFE, polypropylene.
Medium resistance	Polythene, nylon, epoxies.
Low resistance	Polystyrene, PVC, polyesters, ABS, most elastomers.

1.7.2 تآكل المعادن المختلفة Dissimilar Metals Corrosion

الجدول8.2 يبين السلسلة الكلفانية Galvanic Series للمعادن في ماء البحر Sea Water. إن هذه السلسلة تختلف عند إستخدام وسط آخر مثل الماء العذب (الماء الغير مالح) Fresh water أو الجو الصناعي Industrial Atmosphere،

على الرغم من أنه يمكن الحصول على نفس التسلسل التقريبي إلا أنه الفولتية ربما تكون مختلفة. إن هذه القائمة مرتبة بالتسلسل حسب الميل نحو التآكل، إعتماداً على فولتية التآكل الحر Free Corrosion Potential حيث بإمكاننا التنبأ بمقاومة التآكل لخليط من المعادن المختلفة، و كلما كان الفرق كبيراً في الفولتية مابين أي معدنين في السلسلة كلما كانت حدة التآكل عالية بالنسبة للمعدن الأكثر فعالية More Active، عند تعريض الوصلة junction أو التماس مابين تلك المعادن لماء البحر.

بصورة عامة، يعتبر المعدن آنوداً Anode، إذا كان يتميز بفولتية أكثر سالبية More Negative في السلسلة، و كاثوداً Cathode إذا كان يتميز بفولتية أقل سالبية Less Negative أو موجباً Positive في الخلية الكهروكيمياوية Electrochemical Cell.

Platinum	(+0.25 to +0.20)
Graphite	(+0.2 to +0.3)

8.2 الإختيار بالنسبة لمقاومة البلى

Selection for Wear Resistance

البلى Wear هو الفقدان التدريجي في المادة من السطوح نتيجة التماس مع سطوح أخرى. و يمكن أن يحدث نتيجة تماس الإنزلاق Sliding أو الدرفلة Rolling مابين السطوح أو من خلال حركة الموائع (الحاوية على دقائق) على السطوح. و بالنظر لكون البلى عبارة عن تأثير سطحي Surface Effect فإن كل من المعاملات السطحية Surface Treatments و عمليات الطلاء Coating Processes، تلعب دوراً مهماً في تحسين مقاومة البلى. أضف الى ذلك، تلعب عملية التزييت Lubrication مابين السطوح دوراً كبيراً في خفض البلى.

إن سبائك الفولاذ المطاوع (الطري) Mild Steels تتميز بمقاومة بلى ضعيفة، إلا أن زيادة محتوى الكاربون يمكن أن يؤدي الى زيادة مقاومة البلى. أما سبائك الفولاذ الكاربوني وسبائك الفولاذ المنخفضة السبائكية القابلة للإصلاد السطحي Surface Hardenable، فيمكن تحسين مقاومةالبلى فيها بإستخدام المعاملات السطحية مثل الكربنة Carburising، والسيندة Cyaniding، أو الكربنة- نتردة Carbonitriding. ويمكن أيضاً تحسين مقاومة البلى في سبائك الفولاذ المتوسطة الكاربون و الحاوية على كروم أو كروم-ألمنيوم بإستخدام عملية النتردة Nitriding. و يمكن إستخدام الإصلاد السطحي أيضاً لتحسين مقاومة البلى في سبائك الفولاذ ذات المحتوى العالي من الكاربون و الكروم. أما سبائك حديد الزهر الرمادي، فإنها تتميز بمقاومة بلى جيدة في العديد من التطبيقات. إن سبائك حديد الزهر الأبيض تبدي مقاومة أفضل مقارنةً مع سبائك حديد الزهر الرمادي. أما السبائك اللاحديدية مثل سبائك Beryllium coppers، و السبائك ذات أساس كوبلت Cobalt-base Alloys مثل Stellite فإنها تتميز بمقاومة بلى جيدة.

1.8.2 مواد المحامل Bearing Materials

إن المواد المعدنية المستخدمة في المحامل يجب أن تتميز بسطوح صلدة و مقاومة للبلى و معامل إحتكاك منخفض، وفي نفس الوقت متانة كافية. و يمكن تحقيق هذه الشروط بإستخدام سبيكة طرية Soft ولكنها في نفس الوقت متينة Tough. و يجب أن تحوي هذه السبيكة على دقائق صلدة مثبتة في السطح. و عندما تنزلق أحد السطوح على الأخرى، فإن قوة الإحتكاك تتناسب مع القوة العمودية و تكون مستقلة عن مساحة التلامس الظاهرية Apparent Area of Contact مابين سطوح الإنزلاق كما هو معروف في قوانين الإحتكاك. إن مصطلح المساحة الظاهرية، قد إستخدم هنا، لأنه ليس مهماً كم تكون نعومة السطح، فعند المقياس الذري تكون السطوح غير منتظمة و يحدث التماس مابين السطوح المنزلقة عند عدد محدّد من النقاط المنفصلة (نقاط الإلتقاء). و عليه، المساحة الحقيقية للتماس هي فقط جزء صغير من مساحة التلامس الظاهرية. إنها تلك المساحات الحقيقية الصغيرة التي يجب أن تتحمل الحمل مابين السطوح. ونظراً، لكون المساحة الحقيقية تكون صغيرة جداً، فإن الضغط عند نقاط التماس سوف يكون عالياً جداً حتى عند إستخدام حمل خفيف. و بالنسبة للمعادن، فإن هذا الضغط سوف يكون بصورة عامة عالياً بمافيه الكفاية لحدوث التشوّه اللدن Plastic Deformation الملحوظ و الإلتحام Adhesion مابين السطحين عند تلك النقاط. و يطلق على هذه الظاهرة "اللحام البارد للمعادن Cold Welding for Metals ".

وعندما تنزلق السطوح بعضها فوق بعض، تخضع نقاط الإلتقاء هذه الى عملية القص. و لهذا تنشأ قوة الإحتكاك من القوة اللازمة لقص نقاط الإلتقاء و القوة اللازمة لسحج Plough خشونة أحد السطوح بواسطة السطح الآخر.

إن مواد المحامل يمكن أن تصنّف بشكل رئيسي الى خمسة أصناف:

1) المعادن البيضاء White Metals.

2) السبائك ذات أساس نحاس Copper-Base Alloys.

3) السبائك ذات أساس ألمنيوم Aluminium-Base Alloys.

4) مواد المحامل اللامعدنية Non-Metallic Bearing Materials.

5) مواد المحامل معدن-لامعدن Metal-Non-Metallic Bearing Materials.

المعادن البيضاء **White Metals**

عبارة عن سبائك ذات أساس قصدير Tin-Base أو ذات أساس رصاص Lead-Base مع وجود إضافات من عنصر الأنتيمون (Sb) أو النحاس (Cu). إن هذه السبائك تتميز عادة بتركيب مجهري مكون من مركبات معدنية صلدة Hard Intermetallic Compounds من القصدير والأنتيمون المثبّتة في الأرضية الطرية Soft Matrix. إن الدقائق الصلدة تقاوم الحمل، لأن نقاط الإلتقاء تخترق المادة الأكثر طراوة Softer Material، ولكن معظم مساحة التلامس تكون ضمن المادة الطرية، و عليه يحدث الإنزلاق ضمن منطقة رقيقة جداً من المادة الطرية.

إن المعادن البيضاء لها مقاومة كلال منخفضة نسبياً و هذا يمكن أن يحد من إستخدامها في الظروف المنخفضة الحمل Low Load Conditions. إن خفض سمك مادة المحامل، يمكن أن يحسّن من خواص الكلال و لكن ذلك يتطلب مراعاة حجم دقائق المركبات المعدنية الصلدة. إن السبائك ذات أساس قصدير لها مقاومة تآكل جيدة و موصلية حرارية عالية، و كذلك معامل مرونة عالي و إجهاد خضوع عالي مقارنةً مع السبائك ذات أساس رصاص إلا أنها أعلى كلفة من السائك ذات أساس رصاص. و كلا النوعين من السبائك يكون طري نسبياً. إن المحامل تصنّع عادة بواسطة الصب على أشرطة الفولاذ

المحضّرة Prepared Steel Strips ومن ثم الحصول على الشريط المطلوب.
الجدول 92. يبين الخواص النموذجية للمحامل المعدنية.

Alloy and Composition (%)	Manufacturing Process	0.1% Proof Stress (Mpa)	Strength (Mpa)	Hardness (HV)
Whitemetal:tin base				
89.2Sn,7.5Sb,3.3Cu	Cast on steel strip	65	76	27
	Centrifugal casting on steel	39	70	31
Whtemetal:lead base:				
84Pb,10Sb,6Sn	Cast on steel strip	30	42	16
79.5Pb,10Sb,10Sn,0.5Cu	Centrifugal casting on steel	60	73	25
Copper-base alloys				
90Cu,10Sn,0.5P	Cast on Steel	233	420	120
75Cu,20Pb,5Sn	Cast on Steel	124	233	70
80Cu,10Pb,10Sn	sintered on steel	249	303	120
73.5Cu,22Pb,4.5Sn	sintered on steel	81	121	46
Aliminium-base alloys				
92Al,6Sn,1Cu,1Ni	Cast on Steel	50	140	45
89.7Al,6Sn,1.5Cu,1.4Ni,0.9Mg,0.5Si	Cast on Steel	83	207	78

الجدول9.2

التركيب الكيماوي والخواص لمواد المحامل المعدنية

المعادن ذات أساس نحاس Copper Base-Alloys

هذه السبائك تبدي مدى واسع من المقاومة و الصلادة مقارنة مع المعادن البيضاء. أن هذه السبائك تتضمن:

- سبائك البرونز Bronzes الحاوية على (10Sn18-).

- سبائك Leaded-Bronze (1Pb%2-).
- سبائك Phosphor-Bronzes .
- سبائك Copper-lead (25Pb%30-).

إن خواص سبائك النحاس-رصاص تعتمد على محتوى الرصاص، كلما يكون محتوى الرصاص عالياً كلما تكون مقاومة الكلال منخفضة، ولكن خواص إنزلاق أفضل. إنها تتميز بمقاومة تآكل ضعيفة مقارنةً مع المعادن البيضاء و لكن مقاومة بلى أفضل. أضف الى ذلك، معامل مرونة عالي، و مقاومة كلال جيدة. و يمكن تصنيع المحامل بواسطة الصب على شريط الفولاذ Steel Strip أو تلبيد Sintering كل من النحاس و الرصاص على الشريط. أما سبائك البرونز فإنها تتميز بمقاومة أعلى، صلادة أعلى، معامل مرونة أعلى، و مقاومة كلال أفضل مقارنةً مع سبائك النحاس-رصاص و المعادن البيضاء. و عليه، يمكن إستخدامها في محامل الحمل العالي High Load-Bearing. الجدول 2.9 يبين الخواص النموذجية لهذه السبائك.

السبائك ذات أساس ألمنيوم **Aluminium Base-Alloys**

إن سبائك الألمنيوم- قصدير alloy Al-Sn المكونة من (5Ni%1,Cu%1,Sn%7-) و كميات صغيرة من العناصر الأخرى تزود المحامل بمقاومة كلال عالية و كذلك صلادة و مقاومة عالية، وبالتالي تجعلها مناسبة الإستخدام في محامل الحمل العالي. و من مآخذ، هذه السبائك انها تتميز بمعامل تمدد حراري عالي High Thermal Expansivity، وهذه تؤدي بدورها الى رخاوة (فك) الجلبة Bushes أو عملية اللصب Seizing-Up للسطوح أي إلتصاق السطحين المتحركين لنقص الإنزلاق أو الخلوص. إن محامل الفولاذ المدعمة بالألمنيوم Steel-Backed Aluminium Bearings يمكن أن تصنّع

بواسطة درفلة سبيكة الألمنيوم على الفولاذ للسماح بلحام الحالة الصلبة Solid State Welding. أضف الى ذلك، أن المحامل يمكن تصنيعها بواسطة السباكة الرملية Sand Casting أو السباكة بالقوالب المعدنية Die-Casting. الجدول 9.2 يبين الخواص النموذجية.

مواد المحامل اللامعدنية **Non-Metallic Bearing Materials**

البوليمرات مناسبة كمواد محامل و هذه تتضمن: Phenolics, Nylon, Acetal, PTFE. و في بعض التطبيقات يتم إستخدام الحشوات Fillers في البوليمرات مثل النايلون المحشّى بالكرافيت Graphite-Filled Nylon، و كذلك، PTFE المحشّى بمزيت السيليكون PTFE with Silicon، و Acetal المحشّى بمادة PTFE. و بالإضافة الى إستخدام الحشوات في خفض معامل الإحتكاك، فإن الحشوات الأخرى مثل حشوة الألياف الزجاجية Glass Fibers تضاف لزيادة المقاومة و الإستقرارية البعدية.

إن البوليمرات تتميز بمعامل الإحتكاك المنخفض إلا أن لها موصلية حرارية منخفضة. إن إحتكاك البوليمر مع بوليمر آخر يؤدي عادةً الى معدلات بلى عالية و لكن إحتكاك البوليمر مع الفولاذ يؤدي الى معدل بلى منخفض جداً. إن البوليمرات لها معامل تمدد حراري أعلى بكثير من المعادن، و هذه يمكن أن تؤدي الى حدوث مشاكل خلال التطبيقات، على سبيل المثال، تتطلب خلوص عالي مابين السطوح. و لهذا، يتم إستخدامها في تطبيقات الحمل المنخفض و الإستفادة من كلفتها المنخفضة. الجدول 10.2 يبين خواص مواد المحامل البوليمرية الشائعة الإستخدام. و التطبيقات النموذجية تتضمن:

- محامل PTFE المستخدمة في قضبان مقود السيارة PTFE Bearings Car Steering Linkages.

- أجهزة معالجة الأطعمة Food Processing Equipment.
- الفينولات المستخدمة في أعمدة دوران المروحة البحرية Phenolics for Marine Propeller Shafts.
- الأسيتال المستخدم في الأجهزة الكهربائية Acetal for Electric Applications.

Material	Max. Load Pressure (Mpa)	Max. Temp. (^{o}C)	Max. Speed (m/s)
Phenolics	30	150	0.5
Nylon	10	100	0.1
Acetal	10	100	0.1
PTFE	6	260	0.5
Nylon with graphie filler	7	100	0.1
Acetal with PTFE filler	10	100	0.1
PTFE with silicon filler	10	260	0.5
Phenolic with PTFE filler	30	150	0.5

الجدول 10.2

خواص مواد المحامل البوليميرية المستخدمة مع الفولاذ.

مواد المحامل معدن-لامعدن

Metallic-Non-Metallic Bearing Materials

إن المعادن المدعمة بالكرافيت Graphite-Impregnated Metals، و المعادن المدعمة بمادة PTFE-Impregnated Metals PTFE، تستخدم بشكل واسع كمواد محامل. و مثل هذه المواد يمكنها الإستفادة من مزايا معامل الإحتكاك المنخفض و خواص الطراوة للمواد اللامعدنية. من هنا، المعادن المدعمة بالكرافيت التي تحتك مع سطوح الفولاذ يمكن إستخدامها في تحمّل الضغوط التي تصل الى حوالي MPa40 ودرجة حرارة العملية ^{o}C500، بينما المعادن المدعمة بمادة PTFE يمكن إستخدامها عند ضغط MPa100 و درجة حرارة ^{o}C250. الجدول 11.2 وضح الخواص و المقارنة البسيطة لأنواع مختلفة من مواد المحامل.

الجدول 11.2

خواص مواد المحامل.

Material	Hardness (BH)	Yield Stress (Mpa)	Strength (Mpa)	Fatigue Strength (Mpa)	Elastic Modulus (Gpa)	Density (Mg/m3)
Tine-base whitemetal	17-25	30-65	70-120	25-35	51-13	7.3-7.7
Lead-base whitemetal	15-20	20-60	40-110	22-30	29	9.6-10
Copper-lead	20-40	40-60	50-90	40-50	75	9.3-9.5
Phosphor bronze	70-150	130-230	280-420	90-120	80	8.8
Laded tin bronze	50-80	80-150	160-300	80	95	8.8
Aluminium-base	70-75	50-90	140-210	130-170	73	2.9
Polymers	5.0- 20		20-80	5.0- 40	1.0-10	1.0-1.3

Material	Thermal Conductivity W m-1 K-1	Relative Corrosion Resistance	Relative Wear Resistance	Relative Cost
Tine-base whitemetal	50	5	2	7
Lead-base whitemetal	24	4	3	1
Copper-lead	42	3	5	1.5
Phosphor bronze	42	2	5	2
Laded tin bronze	42	2	3	2
Aluminium-base	160	3	2	1.5
Polymers	0.1	5	5	0.3

Note: The larger number for relative corrosion resistance and for relative wear resistance the better the resistance.

إن مادة المحامل تتطلب بلاشك تحقيق شروط متناقضة أي مقاومة عالية وطراوة Softness في نفس الوقت. وإحدى الأساليب لتحقيق المقاومة والطراوة في نفس الوقت في مادة المحامل تتضمن إستخدام مادة طرية Soft Material كبطانة Lining على الفولاذ المستخدم كمادة داعمة Steel Backing أي إستخدام بطانة على المادة الداعمة أو الساندة. على سبيل المثال، إستخدام المعادن البيضاء أو السبائك ذات أساس ألمنيوم أو ذات أساس نحاس بشكل طبقة رقيقة Thin-Layer، على مادة الفولاذ الداعمة. إن اللدائن عندما تستخدم مع مادة الفولاذ الداعمة، يمكن تطبيقها عند السرع العالية،لأن الفولاذ له القدرة على

تشتيت الحرارة بشكل أفضل مما لو إستخدمت المادة اللدائنية لوحدها. أضف الى ذلك، كلما كانت طبقة المادة اللدائنية رقيقة كلما كانت كمية التمدد لها صغيرة.

9.2لإختيار بالنسبة للخواص الحرارية

Selection for Thermal Properties

إن الموصلية الحرارية للمادة Thermal Conductivity هي مقياس معدل إنتقال الحرارة خلال المادة. و بشكل عام، المعادن لها موصلية حررية عالية، البوليمرات و المواد السيراميكة لها موصلية حرارية منخفضة. إن السعة الحرارية النوعية Specific Heat Capacity للمادة هي الطاقة اللازمة لرفع درجة الحرارة Temperature (Kg1) من تلك المادة الى (^{o}C1). بصورة عامة، المعادن تتميز بسعة حرارية نوعية منخفضة، بينما البوليمرات تتميز بسعة حرارية عالية. إن المواد بصورة عامة، تتمدد عندما تخضع للتسخين، و تنشأ مشاكل التمدد الحراري Thermal Expansion في الجزء الهندسي المكون من مواد لها معاملات تمدد حراري مختلفة. بصورة عامة، المواد السيرميكية تتميز بمعامل تمدد حراري Coefficient of Thermal Expansion منخفض، و المعادن تتميز بقيم أعلى من السيراميك و أخيراً البوليمرات تتميز بقيم معامل تمدد حراري أعلى من المعادن. الجدول 122. يبين الخواص الحرارية عند ^{o}C20.

10.2 الإختيار بالنسبة للخواص الكهربائية

Selection for Electrical Properties

بصورة عامة، تعتبر المعادن موصلات كهربائية جيدة و لها مقاومة نوعية Resistivity منخفضة. إن المعادن التي تستخدم بشكل شائع في التطبيقات الهندسية و التي تتميز بموصلية كهربائية جيدة هي الفضة Silver، النحاس

Copper، والألمنيوم Aluminium. و بشكل عام، الموصلية الكهربائية تكون أعلى ما يمكن عندما تكون المادة في أعلى درجات النقاوة Purity، و عندما تكون في الحالة الملدّنة Annealed Condition بشكل تام. وفي أغلب الأحيان، نجد أن المعادن التي تتميز بدرجة نقاوة عالية أو الملدّنة بشكل تام لا تمتلك المقاومة الكافية التي تجعلها مناسبة في تطبيقات مثل الأسلاك مابين الأعمدة الكهربائية Wires Between Posts. أما البوليمرات والسيراميك، فإنها تتميز بشكل عام، بموصلية كهربائية منخفضة، وتصنّف ضمن العوازل الكهربائية Electrical Insulators. الجدول 132. يبين المقاومة النوعية و الموصلية الكهربائية لمدى واسع من المعادن و السبائك عند ^{o}C20. نلاحظ بأن الإيصالية Conductance (القدرة على توصيل التيار الكهربائي) هي معكوس المقاومة Resistance و يعبّر عنها بوحدة السيمنز (S) Siemens، والموصلية Conductivity هي معكوس المقاومة النوعية Resistivity و يعبّر عنها بوحدات (S/m). وفي التطبيقات الهندسية يعبّر عن الموصلية بشكل نسبة مئوية لموصلية النحاس الملدّن Annealed Copper عند ^{o}C20. و يعبّر عن تلك القيم بشكل (IACS(%)). الجدول 14.2 يبين المقاومة النوعية للعوازل.

Material		α (10^6 K^{-1})	C(KJ $Kg^{-1}K^{-1}$)	λ($Wm^{-1}K^{-1}$)
Metals	Aluminium	24	0.9	220-230
	alloys	20-24	0.84	120-200
	Copper	17	0.39	370
	alloys	16-20	0.39	30-160
	Iron	12	0.44	81
	carbon steels	10.0-15.0	0.48	47
	cast irons	10.0-11.0	0.27-0.46	44-53
	alloy steels	12	0.51	13-48
	stainless steel	11.0-16.0	0.51	16.0-26.0
	Magnesium	25	1.02	156
	alloys	25-27		80-140
	Nickel	13	0.44	92
	alloys	10.0-19.0	0.48-0.50	11.0-30.0
	Tin	23	0.23	67
	alloys	22.0-24.0		53
	Titanium	8	0.52	22
	alloys	8.0-9.0		5.0-12.0
	Zinc	40	0.54	11
	alloys	25-35		107-116
Polymers	Thermoplastics	40-300	0.8-2.0	0.1-0.4
	ABS	80-100	1.5	0.13-0.20
	nylon 6	80-100	1.6	0.17-0.21
	polythene	110-200	1.9-2.3	0.25-0.35
	polypropylene	100-120	1.9	0.16
	polystyrene	60-80	1.2	0.12-0.13
	PVC	50-250	1.1-1.7	0.12-0.15
	Thermosets	10.0-60.0	1.0-2.0	0.1-0.4
	epoxy	60	1.1	0.17
	phenol formaldehyde	30-40	1.6-1.8	0.13-0.25
	Elastomers	50-250	1.3-1.8	0.1-0.3
	natural rubber	22	1.9	0.18
	neoprene	24	1.7	0.21
	Cellular polymers			0.02-0.04
Ceramics	Alumina	8.0-9.0	0.7	20-40
	Bonded carbides	4.0-6.0	0.2-1.0	40-120
	Glasses	3.0-9.0	0.5-0.7	0.5-2.0
Composite	Concrete	7.0-14.0	3.3	0.1-2
	Wood		1.7	0.1-0.2
	across grain	35-60		
	along grain	3.0-6.0		

الجدول12.2

الخواص الحرارية

Material	Resistivity($10^{8}\Omega m$)	IACS value(%)
Aluminium(99.996%pure)	2.65	64.9
Brass, cartrdge (70%)	6.2	28
yellow	6.4	27
Constantan(55%Cu,45%Ni)	49.9	3.5
Copper(>99.90%,electrolytic)	1.71	101
(>99.95%, oxygen free)	1.71	101
(-1%cadmium wire)	2.2	80
(-15%zinc alloy)	4.7	37
(-20%zinc alloy)	5.4	32
(-2%nickel alloy)	5	35
(-6%nickel alloy)	9.9	17
Gold	2.35	75
Iron(99.99%pure)	9.7	17.7
(-0.65%C-carbon steel)	18	9.5
Manganin(87%Cu,13Mn)	48.2	3.5
Nichrome(80%Ni,20%Cu)	108	1.6
Nickel(99.8%)	8	23
Phosphor bronze	8.6	20
Patinum	10.6	16
(-10% iridium alloy)	25	7
(-10%rubidium alloy)	43	4
Silver	1.59	106
(-10%copper alloy)	2	85
(-15%cadmium alloy)	4.9	35
Steel ,stainless	56	3.1
(17%Cobalt)	28	6.3
Tungsten	5.65	30

الجدول 13.2 المقاومة النوعية الموصلات عند $^{\circ}c$

Material	Rsistivity (Ωm)
Ceramic:alumina	10^9-10^{12}
porcelain	10^{10}-10^{12}
Diamond	10^{10}-10^{11}
Glass:soda lime	10^9-10^{11}
pyrex	[10^{12}]
Elastomer:butyl	[10^{15}]
natural rubber	10^{11}-10^{15}
polyurethane	[10^{10}]
Mica	10^{11}-10^{15}
Paper(dry)	[10^{10}]
Polymer:acrylic	10^{12}-10^{14}
cellulose	10^8-10^{12}
melamine	[10^{10}]
polyamide(nylon)	10^{10}-10^{13}
polypropylene	10^{13}-10^{15}
polythene:high density	10^{14}-10^{15}
low density	10^{14}-10^{18}
polyvinyl chloride:rigid	1012-1014
flexible	10^9-10^{13}

الجدول14.2

المقاومة النوعية للعوازل

11.2الإختيار بالنسبة للخواص المغناطيسية

Selection for Magnetic Properties

عند دراسة إختيار المادة المغناطيسية، فإن الأسئلة التي تطرح هي: هل أن المادة دائمة المغناطيسية Hard Magnetic Material، أم أنها موقتة المغناطيسية Soft Magnetic. و عندما يتطلب الأمر إستخدام المادة الموقتة المغناطيسية، فإن الأسئلة التي تطرح هي، هل أن المادة لها موصلية جيدة للكهربائية. الجدول 152. يبين الخواص المغناطيسية للمواد الموقتة المغناطيسية، أما الجدول 162. فإنه يبين خواص المواد الدائمة المغناطيسية.إن درجة حرارة كيوري Curie Temperature هي الدرجة الحرارية التي عندها تؤدي الطاقة الحرارية الى فقدان المغناطيسية الحديدية Ferromagnetism.في الجدول 162. تم إستخدام عدد من الأسماء التجارية Trade Names، و العلامة (*) تشير الى مواد الفرايت Ferrites. و المواد الأخرى الموحدة والمتباينة الخواص Isotropic & Anisotropic Materials، جميعها عبارة عن سبائك الحديد، الكوبلت، النيكل، و الألمنيوم.

Material	Max. B(T)	Max. μ_r	Coercive field (A/m)	Energy loss/ cycle (J/m3)	Curie Temp.(K)	Resistivity ($\mu\Omega$m)
Pure iron	2.2	200000	4	30	1043	0.1
Mild steel	2.1	2000	143	500	1000	0.1
Silicon iron Fe+3%Si	2	30000	12	30	1030	0.5
Permalloy (Fe+78.5%Ni)	1.1	100000	4	4	800	0.2
Supermalloy (79%Ni,16% Fe,5%Mo)	0.8	800000	0.16	4	620	0.6
Ferroxcube Mn Zn ferrite	0.25	1500	0.8	13	570	[10^6]

الجدول15.2

المواد الموقتة المغناطيسية

Material	Remanence (T)	Coercive field (KA/m)	Max.(BH) (KJ/m3)	Curie Temp. (K)
Isotropic				
Alni	0.56	46	10	1030
Magloy 6				
Alnico	0.72	45	13.5	1070
Magloy 5				
*Ferroba 1	0.22	135	8	720
*Ferroxdure 100				
*Neoperm D1				
Anisotropic				
Alcomax 3	1.26	52	43	1130
Magloy 1				
Ticonal 600				
Columax	1.35	59	60	1130
Magloy 100X				
*Feroba 2	0.39	150	29	720
*Ferroxdure 300				
*Neoperm E2				
*Feroba 3	0.37	240	26	720
*Ferroxdure 380				
*Neoperm E3				
Steels				
6%tungsten	1.05	5.2	2.4	1030
6%chromium	0.95	5.2	2.4	1030
3%cobalt	0.72	10	2.8	1070
15%cobalt	0.83	14	4.9	1110

A number of alternative trade names are given for entries. * These are Ferrites. The other isotropic and anisotropic materials are all Fe, Co, Ni, Al alloys .

الجدول16.2

المواد الدائمة المغناطيسية

12.2 الأشكال المتوفرة للمواد Available Forms of Materials

إن العامل الرئيسي المؤثر في إختيار المادة هو الشكل Form و الحجم Size الذي يمكن أن تجهّز فيه. فإذا كان التصميم على شكل عارضة بشكل حرف I (I-Girder) بإبعاد معينة لوع معين من الفولاذ، و أن ذلك ليس الحجم الذي تجهّز به المادة بالشكل الطبيعي، فإن حجم المادة يجب أن يخضع الى التغيير بحيث يتم الحصول على الحجم المناسب، من هنا، كلفة الحصول على الحجم الغير قياسي للمادة يجب إستبعادها قدر الإمكان من خلال الإختيار المناسب لشكل و حجم المادة. من هنا، الشكل، و الحجم كما جهّز As-Supplied، للمادة يمكن أن يحّدد طريقة المعالجة اللاحقة إذا تطلب ذلك.

إن الشروط السطحية للمادة المجهّزة يمكن أن تكون مهمة ايضاً، و بشكل خاص عندما نستخدم المادة من دون معالجة لاحقة. من هنا، على سبيل المثال، الفولاذ المدرفل على الساخن Hot-Rolled Steel يمكن أن يحوي على طبقة بشكل قشرة رخوة الإرتباط Loose Flaky Scale على سطحه و بالتالي يجب أن يخضع الى عملية التشغيل اللاحقة لعملية الدرفلة.

إن مصنعي الفولاذ، يمكن أن يجهّزوا الفولاذ بشكل:

- مقاطع دائرية Round.
- مربعة Squares.
- مسطحة Flats.
- على شكل حرف T Tees.
- على شكل قنوات Channels.
- مقاطع دائرية مجوفة Circular Hollow Sections.

- مقاطع مستطيلة مجوفة Rectangular Hollow Sections.
- ألواح الفولاذ المدرفل Rolled Steel Joints.
- الأعمدة و العتبات Universal Beams and Columns.
- الألواح Sheets.

إن المواد البوليمرية تجهّز بصورة عامة، بشكل حبيبات Granules جاهزة لعملية المعالجة. إن التركيب الكيمياوي للحبيبات في نفس المادة البوليمرية يمكن أن يتغير بالإعتماد على المواد الأخرى، على سبيل المثال، الألياف التي سبق و أن تم إضافتها خلال عملية المعالجة أو التصنيع.

13.2 كلفة المواد Cost of Materials

إن كلفة المواد تتغير مع الزمن. و لخفض الحاجة الى تحديد أي وحدة معينة من العملة Currency يتم عادة إستخدام الكلفة النسبية Relative Cost، لأغراض إختيار المواد أي عندما يتطلب الأمر تحديد المادة المثلى Optimum Material. ويعبّر عن الكلفة النسبية عادة لكل وحدة كتلة معرّفة Per Unit Mass بالنسبة للفولاذ الطري أو المطاوع Mild Steel. و في أغلب الأحيان قضيب من الفولاذ الطري أو المطاوع أي:

الجدول 17.2 يبين بعض القيم النموذجية. إن الكلفة النسبية لكل (Kg)

$$\text{Relative Cost} = \frac{\text{Cost per Kg of material}}{\text{Cost per Kg of mild steel}} \qquad [3]$$

يمكن أن تحوّل الى الكلفة النسبية لكل (m^3) بواسطة ضربها في الكثافة.

Material	Relative Cost per Kg	Material	Relative Cost per Kg
Metals		**Polymers**	
Mild steel bar (black)	1	Polyethylene	3
Mild steel bar (bright)	1.3	Polypropylene	3
Mild steel sheet	1.4	Polystyrene	3
Medium-carbon steel	1.6	PVC	6
High-carbon steel bar	2.3	ABS	12
Cast iron casting	2.4	Phenolics	12
Manganese steel bar	2.5	Acrylics	12
Brass sheet	5.1	Cellulose acetate	15
Copper sheet	8.3	Acetals	15
Stainless steel sheet	8.5	Polycarbonate	36
Aluminium bar	8.5	Nylons	45
Nickel chrome steel bar	4.6	Polyurethane	60
Brassbar	6.6	PTFE	90
Aluminium sheet	7.1	Fluorosilicones.	240
Aluminium casting	9.6		
Stainless steel bar	9.6		
Phosphor bronze bar	16		
Monel bar	20.6		

الجدول17.2

الكلفة النسبية للمواد.

المسائل Problems

1) إقترح الخاصية أو الخواص الأساسية المطلوبة للمادة , و أنواع المواد التي يمكن إستخدامها في الحالات التالية:

a) الأنابيب المستخدمة في توزيع الماء الساخن.

b) جزء يتطلب مقاومة عند درجة الحرارة $700^{o}C$.

c) جزء يتميز بالجساءة Stiff.

d) جزء يتطلب مقاومة في الوسط البحري Marine Environment.

e) مادة محامل تتعرض لحمل خفيف Light-Load Bearing Material.

f) حاوية لحفظ الحوامض Acids.

g) جزء يستخدم عند إجهادات مباشرة بحدود 1000MPa .

h) جزء يخضع الى تحميل الصدمة Impact Loading.

i) جزء يخضع الى تحميل دوري Cyclic Loading.

j) قلب المحوّل Transformer Core.

الفصل الثالث

إختيار العمليات

Selection of Processes

الفصل الثالث
إختيار العمليات
Selection of Processes

1.3 مقدمة Introduction

في هذا الفصل سوف ندرس خصائص الأنواع المختلفة من العمليات و طرق التصنيع التي تحدّد أنواع المنتجات التي يمكن إنتاجها. و عند صنع القرار حول طريقة التصنيع Manufacturing Process. التي تستخدم في الحصول على المنتج، فإن هناك عدد من الأسئلة التي يجب الإجابة عليها:

1) ماهي المادة؟ إن نوع المادة المستخدمة يؤثر على إختيار طريقة التصنيع. على سبيل المثال، إذا كانت عملية السباكة Casting هي الطريقة المطلوبة لتصنيع المادة، و كانت المادة لها درجة حرارة إنصهار عالية، فإن طريقة السباكة يجب أن تكون إما سباكة رملية Sand Casting أو سباكة دقيقة Investment Casting.

2) ما هو الشكل Shape؟ إن شكل المنتج، يعتبر عامل أساسي في تحديد طريقة التصنيع أو العملية التي يمكن أن تستخدم. على سبيل المثال، عندما يكون بشكل الأنبوب Tube يمكن إنتاجه بواسطة السباكة المركزية Centrifugal Casting، السحب Drawing، البثق Extrusion. ولكن لايمكن إنتاجه بالطرق الأخرى.

3) ماهو نوع التفاصيل Details المطلوبة؟ هل أن المنتج يجب أن يكون فيه فتحات Holes، أسنان Threads، قنوات Inserts، أو مقاطع مجوفة Hollow Sections ؟... على سبيل المثال، عملية الطرق (الحدادة) Forging لايمكن إستخدامها إذا كان المطلوب وجود مقاطع مجوفة في المنتج.

4) ماهي الدقة البعدية Dimensional Accuracy و السماحات Tolerances المطلوبة؟ إذا كان المطلوب دقة عالية في المنتج فإن طريقة السباكة الرملية سوف تستبعد في هذه الحالة بينما تكون طريقة السباكة الدقيقة الإختيار المناسب لهذا الشرط.

5) هل يتطلب المنتج إستخدام أي من طرق الإنهاء Finishing ؟ هل أن طريقة التصنيع تؤدي الى الحصول على المنتج بحالة إنهاء سطحي نهائي Final Finish State ، أم أنه سوف يتطلب إستخدام طرق إنهاء إضافية. على سبيل المثال، عملية القشط Planing لا تنتج نعومة سطح بالشكل الذي تنتجه عملية التجليخ أو التنعيم Grinding.

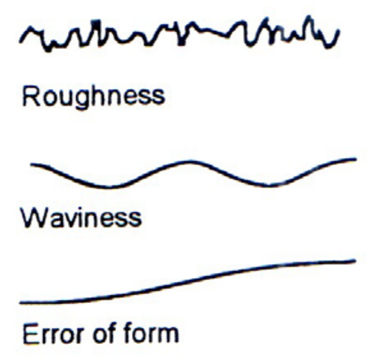
6) ماهي الكميات Quantities المطلوبة؟ هل أن المنتج المطلوب بشكل دفعة صغيرة Small Batch، أم دفعة كبيرة Large Batch أم بشكل إنتاج مستمر Continuous Production ؟ و بينما تكون بعض العمليات إقتصادية في حالة الكميات الصغيرة، بعضها الآخر لاتكون إقتصادية إلا في حالة الكميات الكبيرة. على سبيل المثال، تكون إقتصادية في حالة الحدادة أو الطرق بواسطة القالب المفتوح Open Die Forging الأعداد الصغيرة من المنتجات، بينما تكون الحدادة بواسطة القالب المغلق Closed Die Forging لاتكون إقتصادية مالم يكون عدد المنتجات المطلوبة كبيراً.

2.3 الإنهاء السطحي Surface Finish

من المعروف أن منتج السباكة الرملية يتميز بإنهاء سطحي أكثر خشونة من منتج السباكة بالقوالب المعدنية Die-Casting. و يمكن تعريف الخشونة Roughness بإنها عدم الإنتظام في تركيب السطح Surface Texture الذي يتكون خلال عملية الإنتاج و يكون حاوياً على تموجات Waviness و أخطاء الشكل Error of Form. إن شكل الخشونة يكون عادة عبارة عن سلسلة من القمم Peaks و الوديان Valleys التي يمكن أن تتغير من حيث الإرتفاع و المسافة مابينها و هي تعكس عملية الإنتاج المستخدمة. إن التموج يمكن أن ينشأ من عدة عوامل مثل:

- الماكنة Machine.
- إنحراف الشغلة Work Deflection.
- الإهتزازات Vibrations.
- المعاملة الحرارية Heat Treatment.
- إنفعالات الإلتواء Warping Strains.

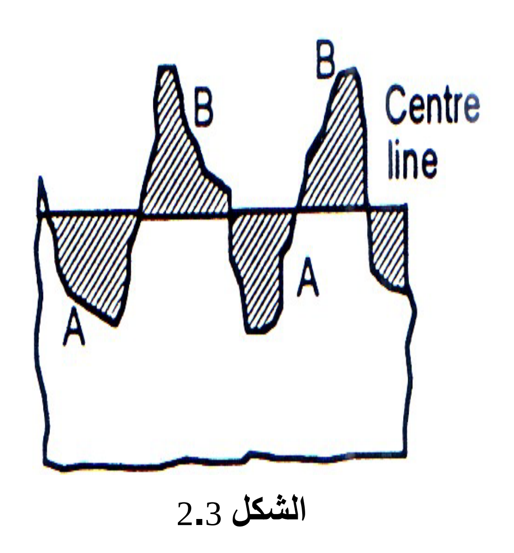
الشكل 1.3.يبين كل من الخشونة Roughness، التموج Waviness، و أخطاء الشكل Errors of Form. و إحدى المقاييس المستخدمة للخشونة هو إنحراف المتوسط الحسابي Arithmetical Mean Deviation الذي يرمز له بالرمز R_a. و هذا يمثل المعدل الحسابي للتغيّر في المقطع فوق و تحت الخط الدليلي خلال طول المعاينة المحدد مسبقاً.



الشكل 1.3 الخشونة ، التموج، و أخطاء الشكل .

إن الخط الدليلي Reference Line يمكن أن يتضمن الخط المركزي Centre Line و هو خط يتم إختياره بحيث أن مجموع المساحات الموجودة مابين هذا الخط وتلك الأجزاء من المقطع السطحي الموجودة على أحد جانبيه تكون متساوية (الشكل 2.3) أي أن:

$$R_a = \frac{\text{Sum of areas A} + \text{Sum of areas B}}{\text{Sample length}} \times 100 \qquad [1]$$



الشكل 2**.**3

المساحة مابين السطح فوق الخط المركزي تساوي المساحة تحت الخط المركزي

و يعبّر عن طول العينة Sample Length بوحدات المليميتر Millimetres والمساحات Areas بوحدات المليمتر المربع Square Millimetres. الجدول 1.3 يبين أهمية قيم R_a التي يعبّر عنها بعبارات تركيب السطح Surface Texture. إن درجة الخشونة Roughness Degree التي يسمح بها في الجزء الهندسي تعتمد على تطبيق أو إستخدام ذلك الجزء. على سبيل المثال، سطوح الإنزلاق الدقيقة Precision Sliding Surface سوف تتطلب قيم R_a محصورة مابين (μm -0.2 0.8) بينما تتطلب سطوح الإنزلاق العامة General Sliding Surface قيم مابين (μm 0.8-3)، و تتطلب أسنان الترس Gear Teeth قيم R_a محصورة

مابين (0.4-1.6 μm) بينما تتطلب سطوح الإحتكاك مثل صفائح القابض Clutch Plates قيم مابين (0.4-1.5 μm)، و تتراوح القيم في سطوح التعشيق Mating Surface مابين (0.5-1.3 μm).

Surface Texture	Roughness R_a μm
Very rough	50
Rough	25
Semi-rough	12.5
Medium	6.3
Semi-fine	3.2
Fine	1.6
Coarse-ground	0.8
Medium-ground	0.4
Fine-ground	0.2
Supper-fine	0.1

الجدول 1.3 علاقة قيم Ra مع تركيب السطح.

الجدول 2.3 يبين درجة الخشونة التي يمكن الحصول عليها في العمليات أو طرق التصنيع المختلفة. و كما نلاحظ من الجدول، أن عملية السباكة الرملية Sand Casting تؤدي الى الحصول على درجة خشونة أعلى على سبيل المثال، من عملية السباكة بالقوالب المعدنية Die-Casting. الدرفلة على الساخن Hot Rolling أيضاً تنتج سطوحاً أكثر خشونة من الدرفلة على البارد Cold Rolling. و كذلك تنتج عملية القطع بالمنشار Sawing سطوحاً أكثر خشونة من منتج عملية القطع بالتفريز Milling.

Process	Roughness R_a μm
Sand casting	25-12.5
Hot rolling	25-12.5
Sawing	25-3.2
Planing, shaping	25-0.8
Forging	12.5-3.2
Milling	6.3-0.8
Boring, turning	6.3-0.4
Investment casting	3.2-1.6
Extruding	3.2-0.8
Cold rolling	3.2-0.8
Drawing	1.6-0.8
Die casting	1.6-0.1
Grinding	1.6-0.1
Honing	1.6-0.1

الجدول 2.3 قيم الخشونة للعمليات المختلفة.

3.3 عمليات تشكيل المعادن Metal-Forming Processes

فيمايلي نناقش خصائص العمليات المختلفة المستخدمة في تشكيل المعادن وأنواع المنتجات التي يمكن الحصول عليها من هذه العمليات.

3.3. 1سباكة المعادن Casting of Metal

عملية السباكة يمكن إستخدامها في الحصول على الأجزاء التي تتراوح كتلتها في المدى (10^{-3} - 10^{4} Kg) و سمك جدار يتراوح مابين (0.5mm-1m). إن عملية السباكة ربما تكون الطريقة المثلى في الحالات المدرجة في أدناه، و لكن هذا لاينطبق على الأجزاء التي يمكن الحصول عليها ببساطة بإستخدام عملية البثق Extrusion أو السحب العميق Deep Drawing :

- الجزء له فجوة داخلية كبيرة Large Internal Cavity، هنا يتطلب إزالة كمية كبيرة من المعدن عند إستخدام عملية التشغيل Machining بينما في عملية السباكة لانحتاج الى إزالة تلك الكمية.

- الجزء له فجوة داخلية معقدة Complex Internal Cavity، عملية التشغيل ربما تكون غير ممكنة للحصول على هذا الجزء بينما يمكن الحصول على الفجوات الداخلية ذات الأشكال المعقدة بإستخدام عملية السباكة.
- الجزء مصنّع من مادة صعبة التشغيل، إن صلادة المادة يمكن أن تجعل عملية التشغيل صعبة جداً مثل حديد الزهر الأبيض White Cast-Iron بينما ذلك لايعتبر مشكلة بإستخدام عملية السباكة.
- المعدن المستخدم عالي الكلفة و يجب أن يكون مقدار الفقدان أقل مايمكن، إن المخلفات Waste الناتجة من عملية التشغيل تكون عادة أكثر من عملية السباكة.
- الخواص الإتجاهية للمادة يجب أن تكون أدنى مايمكن، إن المعادن تخضع عادة الى عملية معالجة بحيث تختلف في أغلب الأحيان خواصها بإختلاف الإتجاهات.
- شكل الجزء يكون معقداً Complex Shape، إن عملية السباكة هي العملية الأكثر إقتصادية من عملية تجميع عدد من الأجزاء المفردة.

إن المعيار المهم حول إتخاذ القرار عند إستخدام عملية السباكة , و أي عملية من عمليات السباكة التي سوف تستخدم هو كلفة العدة المستخدمة Tooling Cost في تصنيع القوالب المطلوبة للسباكة. فعندما يكون المطلوب إنتاج عدد كبير من المسبوكات المتناظرة ففي هذه الحالة يتم إستخدام القالب عدة مرات على عدد المنتجات بحيث أن كلفة القالب توزع على المنتجات وبالتالي تكون العملية إقتصادية. أما إذا كان المطلوب الحصول على منتج واحد -One

Off Product فإن القالب المستخدم يجب أن يكون منخفض الكلفة قدر الإمكان لأن الكلفة الكلية سوف تنفق على منتج واحد فقط.

إن طريقة السباكة لها مميزاتها الخاصة التي تحدّد إستخدامها في الحالة المعينة.الجدول 3.3 يوضح بعض الفروق الأساسية مابين طرق السباكة.

Process	Usual Materials	Section Thickness (mm)	Size (Kg)	Roughness Ra (µm)	Production Rate (Items/hr)
Sand Casting	Most	>4	0.1-200000	25 to 12.5	1.0-60
Gravity die casting	Non-ferrous	3 to 50	0.1-200	3.2 to 1.6	5.0-100
Investment casting	All	1 to 75	0.005-700	3.2 to 1.6	Up to 1000
Centrifugal casting	Most	3 to 100	25mm-1.8m diameter	25 to 12.5	Up to 50
Pressure die casting:high Pressure	Non-ferrous	1 to 8	0.0001-5	1.6 to 0.8	Up to 200
Pressure die casting:low Pressure	Non-ferrous	2 to 10	0.1-200	1.6 to 0.8	Up to 200

الجدول3.3

عمليات السباكة.

إن العوامل التالية تؤثر بصورة كبيرة في تحديد نوع طريقة السباكة المستخدمة:

- المسبوكات الكبيرة الحجم والوزن Large Heavy Casting : السباكة الرملية يمكن إستخدامها في الحصول على المسبوكات الكبيرة جداً.
- التصميم المعقد Complex Design : السباكة الرملية هي الطريقة الأكثر سهولة، ويمكن إستخدامها في الحصول على المسبوكات المعقدة جداً.
- الجدران الرقيقة Thin Walls : إن السباكة الدقيقة Investment Casting و السباكة بالقوالب المعدنية بإستخدام الضغط Pressure Die-Casting يمكن إستخدامها بنجاح للحصول على الجدران الرقيقة التي

يصل سمكها الى (mm1)، بينما لايمكن إستخدام السباكة الرملية بهذا الخصوص.

- إعادة الإنتاج الجيدة للتفاصيل Good Reproduction of Details : إن السباكة بالقوالب المعدنية بإستخدام الضغط، أو السباكة الدقيقة توفر إمكانية جيدة لإعادة الإنتاج بالنسبة للتفاصيل المطلوبة بينما تكون السباكة الرملية رديئة من هذه الناحية.
- الإنهاء السطحي الجيد Good Surface Finish : تبدي كل من السباكة الدقيقة و السباكة بالقوالب المعدنية بإستخدام الضغط إنهاء سطحي جيد بينما يكون الإنهاء السطحي رديئاً في حالة السباكة الرملية.
- سبائك درجات الإنصهار العالية High Melting Point Alloys : حيث يمكن إستخدام السباكة الرملية أو السباكة الدقيقة بهذا الخصوص.
- كلفة صنع العدد Tooling Cost : حيث تكون أعلى مايمكن في حالة السباكة بالقوالب المعدنية بإستخدام الضغط، وأقل مايمكن في حالة السباكة الرملية. و عندما يكون عدد المنتجات كبيراً فإن كلفة صنع القوالب سوف تنفق على عدد كبير من المسبوكات، بينما كلفة القالب في حالة السباكة الرملية هي نفسها بغض النظر عن عدد المسبوكات المنتجة لأنها تتطلب إستخدام قالب جديد لكل مسبوكة.

2.3.3 معالجة المعادن Manipulation of Metals

طرق معالجة المعادن، تتضمن تشكيل المادة بواسطة أساليب التشكيل اللدن Plastic Deformation. وهذه الطرق تتضمن:

- الطرق (الحدادة) Forging.

- البثق Extrusion.
- الدرفلة Rolling.
- السحب Drawing.

و إعتماداً على الطريقة المستخدمة فإن الأجزاء يمكن إنتاجها بحجوم تتراوح في المدى (10^{-5} -100Kg). و سمك جدار يتراوح مابين (0.1mm-1m0). الجدول 4.3، يبين بعض خصائص هذه الطرق. إن المواد المطيلية Ductile Materials المشار إليها في الجدول، تتضمن سبائك الألمنيوم، النحاس، المغنيسيوم الشائعة، والى حد ما سبائك الفولاذ الكاربوني و سبائك التيتانيوم.

Process	Usual Materials	Section Thickness (mm)	Minimum size	Maximum Size	Roughness Ra(μm)	Production Rate (Item/hr)
Closed-die forging	Steels,Al,Cu Mg alloys	3 upwards	10 cm^2	700 cm^2	3.2-12.5	Up to 300
Roll forming	Any ductile material	0.2-6			0.8-3.2	
Drawing	Any ductile material	0.1-25	3 mm dia.	6 m dia.	0.8-3.2	Up to 3000
Impact extrusion	Any ductile material	0.1-20	6 mm dia.	0.15 m dia.	0.8-3.2	Up to 2000
Hot extrusion	Most ductile materials	1.0-100	8 mm dia.	500 mm dia.	0.8-3.2	Up to 720
Cold extrusion	Most ductile materials	0.1-1000	8 mm dia.	4 m long	0.8-3.2	Up to 720

Note:Ductile materials are commonly aluinium , copper, and magnesium alloys and to a lesser extent carbon steels and titanium alloys.

الجدول 4.3

عمليات المعالجة

إن المنتجات المطروقة (المشكلة) Wrought Products تتميز بدرجة تجانس و معولية خواص ميكانيكية أفضل مقارنةً مع المسبوكات Castings. كما أن طرق التشكيل اللدن تعطي خواص إتجاهية Directional Properties للمنتج بخلاف طرق السباكة. و يمكن أن تكون طريقة التشكيل الطريقة المثلى للحصول على المنتج في الحالات التالية:

- الجزء المراد تشكيله من لوح معدني Sheet Metal : إعتماداً على الشكل المطلوب، فإن عمليات القص Shearing، الحني (الثني) Bending، أو السحب Drawing تعتبر الأساليب المناسبة عندما لاتكون الأجزاء المطلوبة كبيرة جداً.
- إذا كان المطلوب الحصول على أطوال طويلة Long Length و مساحة المقطع العرضي ثابتة : إن كل من عملية البثق Extrusion، و الدرفلة Rolling تعتبر الطرق المثلى في الحصول على أطوال طويلة و بمقاطع عرضية معقدة الشكل و من دون الحاجة الى عمليات تشغيل Machining.
- الجزء غير حاوي على فجوات داخلية Internal Cavities : طريقة الحدادة (الطرق) تعتبر الطريقة المفضلة عندما يكون المطلوب عدم إحتواء الجزء على فجوات داخلية، و بشكل خاص، عندما يكون المطلوب متانة و مقاومة جيدة حيث نحصل على نتائج أفضل مقارنةً مع عملية السباكة. أضف الى ذلك، الخواص الإتجاهية يمكن أن تمنح للمادة و بالتالي تحسين أدائه في التطبيق.
- إذا كان المطلوب الحصول على أجزاء بشكل كوب أو قدح Cups أو بشكل علب Cans : طريقة الحني (الثني) Bending أو الفلطحة Upsetting يمكن أن تستخدم بهذا الخصوص.
- إذا كان الجزء المطلوب بشكل سلك Wire أو قضيب Bar : طريقة السحب العميق Deep Drawing أو البثق بالصدمة Impact Extrusion تعتبر الطرق المثلى بهذا الخصوص.

3.3.3 طرق المسحوق **Powder Processes**

إن طريقة المسحوق Powder Process يمكن بواسطتها الحصول على عدد كبير من المنتجات الصغيرة و بمعدلات إنتاج عالية تصل الى 1800 Per Hour مع الحاجة البسيطة الى عمليات تشغيل (إذا تطلب ذلك). و يمكن بواسطتها تصنيع المنتجات من جميع المواد و بشكل خاص تلك المواد التي لايمكن معالجتها بإستخدام الطرق الأخرى، على سبيل المثال، المعادن ذات درجات الإنصهار العالية مثل Mo,Ta, W. و كذلك، عندما يكون المطلوب الحصول على درجة معينة من المسامية Porosity كما هو الحال في المحامل المسامية Porous Bearings التي يجب أن تملأ بالزيت. و على أساس الأوزان Weight-for-Weight Basis، تعتبر منتجات المساحيق المعدنية أعلى كلفة من طرق التشكيل أو السباكة، إلا أن هذه الكلفة العالية يمكن أن تعادل مع غياب النفايات أو السكراب Scrap، و الإنخفاض في عملية الإنهاء السطحي بإستخدام طرق التشغيل، و أخيراً معدلات الإنتاج العالية. إن أقصى حجم للمنتجات بإستخدام طريقة المساحيق يصل الى حوالي 5 Kg4..

4.3.3 تشغيل المعادن **Machining of Metals**

عند إختيار طريقة القطع Cutting Process فإن العوامل التالية مهمة جداً في تحديد الطريقة أو الطرق المثلى Optimum Process or Processes :

- العمليات يجب أن تتميز بأدنى كمية من المادة المزالة Removal Materials. و هذا يخفض بدوره من تكاليف المواد، تكاليف الطاقة المطلوبة في عملية التشغيل و كذلك تكاليف بلى الأداة Tool Wear.
- الوقت المستهلك خلال العملية يجب أن يكون أدنى مايمكن و ذلك لخفض تكاليف الأيدي العاملة.

- المهارات المطلوبة تؤثر على تكاليف اليد العاملة.
- إن خواص المادة المراد تشغيلها يجب أن تؤخذ بنظر الإعتبار، وبشكل خاص الصلادة Hardness. و بصورة عامة، كلما كانت المادة صلدة كلما كانت الفترة الزمنية اللازمة لعملية القطع طويلة. أضف الى ذلك، أن صلادة المادة تؤثر على إختيار مادة العدة Tool Material التي يمكن أن تستخدم، كما أن المواد التي تتميز بالصلادة العالية جداً، تؤثر أيضاً على طريقة القطع المستخدمة. على سبيل المثال، عملية التنعيم أو التجليخ Grinding هي الطريقة التي يمكن إستخدامها مع المواد الصلدة جداً لأن مادة العدة (دقائق السحج أو الحك Abrasive Particles) لها صلادة عالية جداً، وهذا يؤدي بدوره الى أكبر كمية ممكنة من التشغيل. من هنا، يجب الأخذ بنظر الإعتبار نوع أصناف المواد Materials Grades المستخدمة في تصنيع مادة العدة حيث أنها تؤثر على الفترة الزمنية لعملية القطع.
- عند إختيار الطريقة أو الطرق يجب الأخذ بنظر الإعتبار كمية المنتجات المطلوبة، و معدل الإنتاج المطلوب.
- إن الشكل الهندسي المطلوب للمنتج يجب أن يؤخذ بنظر الإعتبار عند إختيار الطريقة أو الطرق المناسبة.
- الإنهاء السطحي المطلوب و الدقة البعدية أيضاً تؤثر في إختيار الطريقة أو الطرق المناسبة.

إن عمليات التشغيل تختلف بصورة كبيرة من حيث الكلفة، و بشكل خاص عند إختيار العملية بالإعتماد على الكلفة المطلوبة للعملية المعينة لتحقيق خلوص

Tolerance معين. على سبيل المثال، لتحقيق خلوص مقداره 0.10mm، فإن ترتيب العمليات إعتماداً على الكلفة يكون كالآتي:

Process	Cost
Shaping	Most expensive
Planing	
Horizontal boring	
Milling	
Turret (capstan)	Leas expensive

إن كلفة جميع العمليات أعلاه، يزداد مع زيادة الخلوص المطلوب Required Tolerance. و في حالة الخلوص العالي، تعتبر عملية التجليخ Grinding من أقل العمليات كلفة. إن عمليات التشغيل المختلفة تؤدي عادة الى إنهاء سطحي مختلف كما مبين في الجدول5.3.

Machining Process	Ra (μm)	
Planing and shaping	25-0.8	Least smooth
Drilling	8-1.6	
Milling	6.3-0.8	
Turning	6.3-0.4	
Grinding	1.6-0.1	Most smooth

الجدول5.3

الإنـهاء السطحي لعمليات التشغيل.

إن إختيا الهندسي المطلوب للمنتج. الجدول6. 3 يبين الطرق المستخدمة في الحصول على أشكال هندسية مختلفة.

Type of Surface	Suitable Process
Plane surface	Shaping, planing, face milling, surface grinding
Externally cylinderical surface	Turning ,grinding
Internally cylinderical surface	Drilling, boring, grinding
Flat and contoured surfaces and slots	Milling, grinding .

الجدول6.3

عمليات التشغيل للحصول على أشكال هندسية مختلفة

إن عملية التشغيل، بصورة عامة، هي عملية عالية الكلفة نسبياً عند مقارنتها مع الطرق الأخرى المستخدمة في تشكيل المواد، و على الرغم من ذلك، فإن عملية التشغيل، طريقة سهلة جداً، و يمكن بواسطتها الحصول على مدى واسع من الأشكال المختلفة. إن الجزء المهم، في كلفة التشغيل الكلية Total Machining Cost للمنتج هو الفترة الزمنية اللازمة لعملية التركيب Setting-Up Times حيث يكون هناك إنتقال من خطوة تشغيل الى أخرى. فعند خفض عدد خطوات التشغيل و بالتالي الفترة الزمنية لعملية التركيب، فإن ذلك يؤثر بدوره على كلفة التشغيل الكلية. من هنا، يجب الأخذ بنظر الإعتبار، التسلسل في عمليات التشغيل و كذلك إختيار الماكنة التي سوف تستخدم في عملية التشغيل.

5. 3 .3 عمليات ربط المعادن Joining Processes of Metals

إن عملية التصنيع تتطلب في أغلب الأحيان ربط المواد بحيث يمكن تجميع تراكيب كبيرة جداً، أكبر من تلك التراكيب التي يمكن الحصول عليها بإستخدام الطرق الأخرى مثل السباكة و الحدادة. إن عمليات الربط الرئيسية تتضمن:

- الربط الإلتصاقي Adhesive Bonding.
- لحام الكاوية Soldering.
- اللحام Welding.
- اللحام بالنحاس الأصفر أو القصدير Brazing.
- أنظمة الربط أو التثبيت Fastening Systems.

أما العوامل التي تحدّد طريقة أو عملية الربط Joining Process فهي تتضمن:

- المواد المطلوبة Materials Involved.
- شكل الأجزاء المراد لحامها Shape of Components.
- وصلات اللحام دائمة أم موقتة The Joint is to be Permanent or Temporary.
- محددات الوسط و الكلفة Environment and Cost Limitations.

إن وصلات اللحام Weld Joints، و وصلات اللحام بالنحاس الأصفر والقصدير Brazed Joints، ووصلات الربط الإلتصاقي Adhesive Joints، ووصلات التثبيت Fastening Joints مثل الوصلة المبرشمة Riveted Joints هي بصورة عامة وصلات لحام دائمة Permanent Joints. بينما وصلات لحام الكاوية Soldered Joints، و وصلات الربط بالمسامير الملولبة أو البراغي Bolted Joints يمكن فصلها بسهولة و من إعادة ربطها Rejoined أي أنها تمثل وصلات لحام موقتة Temporary Joints.

4 .3 عمليات تشكيل البوليمر Polymer Forming Process

إن القولبة بالحقن Injection Moulding و البثق Extrusion تعتبر من الطرق الشائعة و المستخدمة بشكل واسع في تشكيل البوليمر. حيث أن القولبة بالحقن تستخدم بصورة عامة في حالة الإنتاج العالي أي الإنتاج بالجملة Mass Production للأجزاء الصغيرة Small Items التي تكون في أغلب الأحيان ذات أشكال معقدة Intricate Shapes. أما بالنسبة لعملية البثق، فإنها تستخدم في حالة المنتجات التي تتطلب أطوال مستمرة Continuous Lengths أو تصنّع من مواد

لها مقطع عرضي ثابت Constant Cross Section. و فيما يلي بعض العوامل المطلوبة في إختيار العملية:

- معدل الإنتاج Rate of Production : إن زمن الدورة لكل عملية هو كمايلي:

)1Injection Moulding and Blow10) -60s.(القولبة بالحقن و النفخ

)2Compressing Moulding 20) -600s.(القولبة بالضغط

)3Rotational Moulding 70) -1200s.(القولبة الدورانية

)4Thermoforming10) -60s.(التشكيل الحراري

- الإستثمار المطلوب لرأس المال Capital Investment Required: إن عملية القولبة بالحقن تتطلب رأس مال عالي بينما عملية البثق والقولبة بالنفخ تتطلب رأس مال أقل. أما بالنسبة لعمليات القولبة الدورانية، القولبة بالضغط،القولبة بالنقل أو التحويل Transfer Moulding، التشكيل الحراري و السباكة فإنها تتطلب أدنى كمية ممكنة من رأس المال.
- سير الإنتاج الأكثر إقتصادي Most Economic Run : إن القولبة بالحقن، والقولبة بالبثق و النفخ، تكون إقتصادية فقط عندما يكون سير الإنتاج كبيراً. أما بالنسبة للتشكيل الحراري، القولبة الدورانية Rotational Moulding و لتشغيل Machining فإنها تستخدم عادة مع سير الإنتاج الصغير. الجدول3.7 يبين القيم الدنيا لخرج أو نتاج العملية Minimum Output المطلوب لجعل العملية أكثر إقتصادية.

Process	Economic Output Number
Machining	From 1 to 100 items
Rotational moulding	From 100 to 1000 items
Sheet forming	From 100 to 1000 items
Extrusion	Length 300 to 3000 m
Blow moulding	From 1000 to 10000 items
Injection moulding	From 10000 to 100000 items

الجدول7.3

أدني خرج أو نتاج للعملية.

الإنـهاء السطحي Surface Finish : إن عمليات التشكيل (القولبة بالحقن، القولبة بالنفخ، القولبة الدورانية، التشكيل الحراري، القولبة بالضغط، القولبة بالنقل، و السباكة) تتميز عادة بإنهاء سطحي جيد، أما بالنسبة لعملية البثق فإنها تتميز بإنهاء سطحي معتدل.

- المعادن المولجة خلال العملية Metals Insert during Process : هذه تكون ممكنة في حالة القولبة بالحقن، القولبة الدورانية، القولبة بالنقل و السباكة.
- الدقة البعدية Dimensional Accuracy : إن القولبة بالحقن و القولبة بالنقل تكون عادة جيدة جداً بهذا الخصوص. أما القولبة بالضغط و السباكة فإنها تكون جيدة، بينما تكون عملية البثق ضعيفة من هذه الناحية.
- حجم المنتج أو الجزء المطلوب Item Size : إن القولبة بالحقن و التشغيل تكون مفضلة في حالة المنتجات الصغيرة. و يمكن الحصول على سمك مقطع بحدود mm1 بإستخدام القولبة بالحقن، التشكيل، و البثق.

- الأشكال المجوفة المغلقة Enclosed Hollow Shapes : القولبة بالنفخ و القولبة الدورانية يمكن أن تستخدم بهذا الخصوص.
- الأشكال المعقدة Complex Shapes : في هذه الحالة، يمكن إستخدام القولبة بالحقن، القولبة بالنفخ، القولبة بالنقل، و السباكة.
- الأسنان Threads : الأسنان يمكن إنتاجها بإستخدام القولبة بالحقن، القولبة بالنفخ، السباكة، و التشغيل.
- الألواح المشكلة الكبيرة Large Formed Sheets : التشكيل الحراري يمكن إستخدامه بهذا الخصوص.

إن عمليات التجميع Assembly Processes التي يمكن إستخدامها مع اللدائن Plastics هي:

- اللحام Welding.
- الربط الإلتصاقي Adhesive Bonding.
- البرشمة Riveting.
- مطابقة الإبزيم Snap-Fit.
- أنظمة الأسنان Thread Systems.

الجدول 3. 8 يبين طرق المعالجة المستخدمة في حالة بعض اللدائن اللدنة حرارياً Thermoplastics الشائعة الإستخدام، والجدول 3. 9 في حالة اللدائن الصلدة حرارياً Thermosetting.

Polymer	Extrusion	Injection Moulding	Extrusion Blow Moulding	Rotational Moulding	Thermo-forming	Casting	Bending and Joining	As Film
ABS	*	*		*	*		*	
Acrylic	*	*			*	*	*	
Cellulosics	*	*			*			*
Polyacetal	*	*	*					
Polyamide	*	*		*		*		*
Polycarbonate	*	*	*		*		*	
Polyester	*	*						
Polyethylene HD	*	*	*	*			*	*
Polyethylene LD	*	*	*	*			*	*
Polyethylene terephthalate	*	*	*					*
Polypropylene	*	*	*	*	*		*	*
Polystyrene	*	*	*		*		*	*
Polysulphone	*	*						
PTFE	*							
PVC	*	*	*	*	*		*	*

الجدول8.3

طرق معالجة اللدائن اللدنة حرارياً.

Polymer	Compression Moulding	Transfer Moulding	Casting	Laminate	Foam	Film
Epoxy			*	*	*	
Melamine formaldehyde	*	*		*		
Phenol formaldehyde	*	*	*	*	*	
Polyster	*	*	*	*		*
Urea formaldehyde	*	*		*		

الجدول9.3

طرق معالجة اللدائن الصلدة حرارياً.

3. 5 مظاهر الكا

The Cost As

بإستخدام السباكة الرملية Sand Casting نحتاج الى قالب جديد لكل جزء نريد سباكته. بينما في حالة السباكة بالقوالب المعدنية Die-Casting يمكننا

إستخدام نفس القالب لأعداد كبيرة من الأجزاء المراد سباكتها إلا أن كلفة القالب الأولية سوف تكون عالية. فإذن ماهي الطريقة الأقل كلفة إذا كان المطلوب على سبيل المثال، الحصول على (10) أجزاء (منتجات) أو ربما (1000) جزء؟

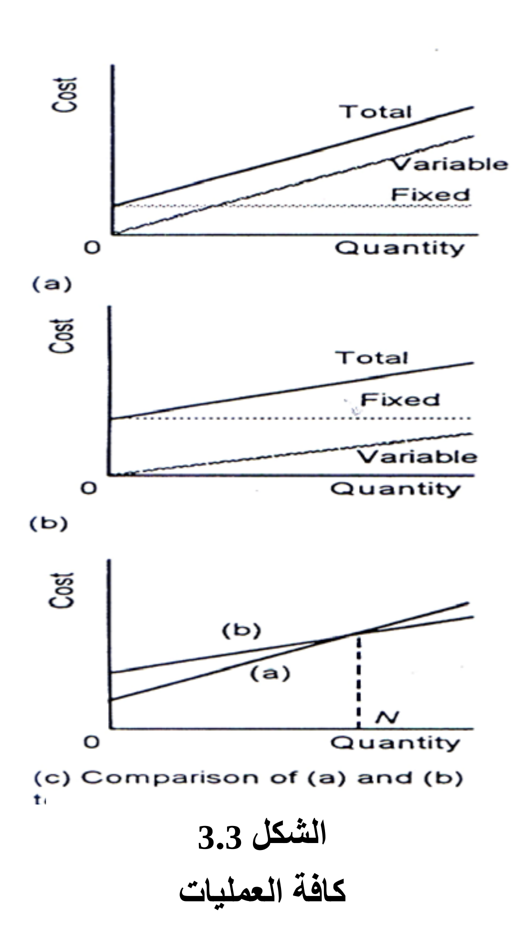
إن كلفة طريقة التصنيع Manufacturing Process لأي عملية، يمكن تقسيمها الى قسمين:

1) التكاليف الثابتة Fixed Costs.

2) التكاليف المتغيرة Variable Costs.

الشكل3. 3يبين الأشكال النموذجية، التي تبين العلاقة مابين الكلفة Cost والكمية Quantity للعمليات حيث أن:

- هناك كلفة ثابتة منخفضة و لكن كلفة متغيرة عالية لكل جزء، على سبيل المثال، السباكة الرملية Sand Casting.
- هناك كلفة ثابتة عالية، و لكن كلفة متغيرة منخفضة لكل جزء، على سبيل المثال، السباكة بالقوالب المعدنية Die-Casting.



الشكل 3.3

كافة العمليات

إن الكلفة الكلية Total Cost، هي مجموع الكلفة الثابتة و المتغيرة لكل جزء. الشكل 3c3.، يبين خطوط الكلفة الكلية بالنسبة للعمليات المبينة في الأشكال 3a3. و3b3. أي عملية السباكة الرملية و عملية السباكة بالقوالب المعدنية. و تحت الكمية Quantity(N)، فإن العملية التي تعطي الرسم المبين في الشكل 3a3. هي أقل كلفة من العملية التي تعطي الرسم 3b3.. و فوق الكمية (N) يكون العكس، أي حالة (b) أقل كلفة من حالة (a). من هنا عناصر الكلفة تكون كالآتي:

- الكلفة الثابتة Fixed Cost.

- الكلفة المتغيرة Variable Cost.

الكلفة الثابتة Fixed Cost

حيث تتضمن تكاليف رأس المال بالنسبة للتركيب أو الإنشاء، على سبيل المثال، كلفة الماكنة أو حتى المسبك Foundry. تنفق عادة على العمر المتوقع Life Time للتركيب.و لكن خلال سنة واحدة ربما يكون هناك إستهلاك للتركيب الأصلي، و بالتالي هناك كلفة تنفق مقابل الإنتاج في تلك السنة. فإذا كانت المصروفات المالية Capital Expenditure المطلوبة لشراء ماكنة و تركيبها على سبيل المثال £50,000، فإنه خلال سنة واحدة ربما يكون الإستهلاك 10%، و بالتالي £5000، سوف تنفق ككلفة مالية أي عنصر الكلفة الثابتة Element of The Fixed Cost، مقابل كمية إنتاج ذلك المنتج في تلك السنة، وهناك عنصر آخر للكلفة الثابتة، و هو كلفة القوالب أو العدد اللازمة لذلك المنتج. أما العوامل الأخرى التي يمكن أن تلحق مع التكاليف الثابتة فإنها تتضمن، تكاليف صيانة الوحدة الصناعية Plant Maintenance, وإصلاح أو ترميم القالب أو العدة.

الكلفة المتغيرة Variable Costs

التكاليف المتغيرة تتضمن:

- تكاليف المواد Materials Costs.
- تكاليف الأيدي العاملة Labour Costs.
- تكاليف القدرة Power Costs.
- تكاليف الإنهاء Finishing Costs.

إن الأسئلة التي يمكن ان تطرح عند تقدير كلفة المنتج تتضمن:

- هل أن التركيب المراد إستخدامه مقتصراًً على منتج واحد فقط؟ إن الغرض من هذا السؤال هو لتحديد فيما إذا كانت كلفة رأس المال الكلي تنفق مقابل منتج أم يمكن أن توزع على عدد من المنتجات.
- هل أن تصنيع العدة المراد إستخدامها يكون مقتصراًً على منتج واحد فقط؟ إذا كان ذلك مقتصراًً على ذلك المنتج، فإن الكلفة الكلية سوف تنفق مقابل ذلك المنتج.
- ماهي تكاليف الأيدي العاملة المباشرة لكل جزء أو منتج Direct Labour Costs Per Items؟ إن تكاليف الأيدي العاملة المباشرة تتضمن التكاليف التي تتعلق بشكل مباشر بالأيدي العاملة المستخدمة في عملية الإنتاج.
- ماهي تكاليف الأيدي العاملة الأخرى المطلوبة؟ و تسمى هذه التكاليف، أيضاً تكاليف الأيدي العاملة الغير مباشرة Indirect Labour Costs و هي تتضمن على سبيل المثال، تكاليف الفحص أو التفتيش Inspection Costs، تكاليف الإشراف أو المراقبة Supervision...الخ.
- ماهي كلفة القدرة Power Cost؟
- هل هناك أي عمليات إنهاء مطلوبة، إذا كان كذلك ماهي كلفتها؟
- ماهي تكاليف المواد Materials Costs؟
- هل هناك أي تكاليف يمكن أن توجد للنفقات العامة Overhead Costs؟ إن تكاليف النفقات العامة، تتضمن، التكاليف التي لايمكن

للشركة تحديدها لأي عمل Job أو منتج Product و لكنها جزء من الكلفة الإجمالية للشركة Overall Company Costs مثل كلفة التلفون (الهاتف) Telephone Cost، كلفة إيجار المعمل أو المصنع Factory Rent، كلفة إدارة الرواتب Management Salaries.

مثال3.1

قارن مابين القولبة بالحقن Injection Moulding و القولبة الدورانية Rotational Moulding كطرق لإنتاج 1000 جزء من المنتج المعين على أساس البيانات التالية، على فرض أن تكاليف التركيب أو الإنشاء Installation Costs تنفق بنسبة 10% لكل سنة.

	Injection Moulding (£)	**Rotational Moulding (£)**
Installation cost	90000	10000
Die costs	2000	500
Direct labour costs/item	0.3	1.4
Indirect labour costs/item	0.15	0.3
Power costs/item	0.06	0.15
Finishing costs/item	1	0
Material costs/item	0.4	0.4

إن عناصر الكلفة الثابتة Fixed Costs و الكلفة المتغيرة Variable Costs لكلا العمليتين يمكن أن تحسب كالآتي:

	Injection Moulding (£)	Rotational Moulding (£)
Fixed costs		
Installation cost depreciation	900	1000
Die costs	2000	500
Total fixed cost	11000	1500
Variable costs		
Direct labour costs/item	0.3	1.4
Indirect labour costs/item	0.15	0.3
Power costs/item	0.06	0.15
Finishing costs/item	1	0
Material costs/item	0.4	0.4
Total fixed cost	1.91	2.25
Costs for 1000 items		
Fixed costs	11000	1500
Variable costs	1910	2250
Total fixed cost	12910	3750

وعلى أساس تقدير الكلفة أعلاه، نستنتج أن، القولبة الدورانية لها كلفة أقل بكثير من القولبة بالحقن.

المسائل Problems

1) إقترح طريقة السباكة للحالة التالية: مسبوكة صغيرة One-Off Casting من الألمنيوم تحوي على كمية كبيرة من التفاصيل التي يجب إعادة إنتاجها و بإنهاء سطحي جيد.

2) إقترح الطرق التي يمكن إستخدامها في تصنيع المنتجات المعدنية التالية:

أ. أنبوبة معجون الأسنان Toothpaste Tube من سبيكة طرية Soft Alloy.

ب. إنتاج كبير (إنتاج بالجملة Mass-Production) لعجلات البكرة المخدّدة (Grooved Pulley Wheels.

ج. علبة الألمنيوم Aluminium Can لخزن المشروب Drink Storage.

د. قضيب البراص Brass Rod الحاوي على تجويف سداسي طولي.

هـ. خطوط سكك الحديد Railway.

و. مقلاة مطبخية Kitchen Pan من الألمنيوم.

3) إقترح الطرق التي يمكن إستخدامها في تصنيع المنتجات البوليمرية التالية:

أ. دمية صغيرة Small Toy عند معدلات إنتاج عالية من المادة اللدائنية اللدنة حرارياً Thermoplastic Material.

ب. قنينة سعة واحد لتر 1 litre Bottle للمشروب اللاكحولي Soft Drink عند معدلات إنتاج عالية من مادة لدائنية لدنة حرارياً Thermoplastic Material.

ج. غطاء المفتاح الكهربائي Switch Cover عند معدلات الإنتاج العالي بإستخدام مادة لدائنية صلدة حرارياً Thermosetting Material.

د. ممخضة الحليب Milk Churns قطرها 340 mm و إرتفاعها 760 mm من البولي أثيلين.

هـ. شريط من المادة اللدائنية اللدنة حرارياً Thermoplastic Strip يستخدم لعزل التيار الكهربائي.

و. أكياس البولي أثيلين Polyethylene Bags بمعدلات إنتاج عالية.

ز. هيكل الكاميرا Camera Body بمعدلات إنتاج عالية.

ح. هيكل المثقاب الكهربائي Electric Drill إذا كان المطلوب وجود فتحات مسننة Threaded Holes و معدلات إنتاج عالية.

4) إذا علمت أن مهندس الإنتاج Production Engineer أراد خلال عملية تخطيط الإنتاج Production Planning إتخاذ القرار حول إستخدام عملية الخراطة المناسبة من خلال الخيارات المتوفرة لطرق الخراطة:

1Lathe. المخرطة.

2Capstan Machine. الماكنة الرحوية.

3Automatic Machine. الماكنة الأوتوماتية.

5) علماً أنه إستخدم البيانات التالية لأغراض مقارنة الكلفة:

Machine	Fixed Costs per Product (£)	Variable Costs per item (£)
Lathe	17	2.7
Capstans	27	1.5
Automatic	170	1

أ. حدّد الترتيب للطرق التي تكون أكثر إقتصادية.

ب. كم سيكون التأثير عند زيادة الأجرة Wages للعاملين Workers و التي تؤدي الى زيادة الكلفة المتغيرة بمقدار 10%؟

ج. كم سيكون تأثير مكائن الخراطة الجديدة المطلوبة عند زيادة كلفتها الثابتة بمقدار 10%.

6) شركة تتلقى أمراً، حول تصنيع عدة ماكنة معينة، علماً أن هذا الجزء لم تصنّعه الشركة من قبل، و عليه، الطريقة التي سوف تستخدم في عملية التصنيع يجب أن تؤخذ بنظر الإعتبار. و هناك، طريقتين يمكن إستخدامهما بهذا الخصوص. إحدى هذه الطرق تتضمن تصنيع الجزء بشكل كامل بواسطة سباكة حديد الزهر الرمادي Grey Cast Iron Casting، و الطريقة الأخرى، تتضمن تجميعه من مقاطع الفولاذ و لحام

إذا Sand Castingالأجزاء المختلفة معاً بعد عملية التشغيل. و بالنسبة للسباكة تم إقتراح السباكة الرملية

، التكاليف £400 هي Sand Patternكان المطلوب جزء واحد فقط علماً أن كلفة تصنيع النموذج الرملي

هي Fixed Costs و التكاليف الثابتة £590 للمواد و الأيدي العاملة هي Variable Costsالمتغيرة

£500. هذا و إن النموذج يمكن إستخدامه لتصنيع أكثر من قالب. أما بالنسبة لتصنيع الجزء، فإن التكاليف

هي Raw Materials، المواد الأولية Welding، اللحام Machiningالمتغيرة المرتبطة بعملية التشغيل

£670 و التكاليف الثابتة هي £300 .

) ماهي الطريقة الأكثر One-Offأ. بالنسبة للإنتاج المفرد (إنتاج جزء واحد فقط Production

إقتصادية.

، يقترح بأنه يمكن أن يكون هناك سوق Marketingب. قبل تصنيع المنتج أو الجزء، قسم التسويق

بالنسبة للأعداد الصغيرة من هذا الجزء. إرسم المخططات التي تبين كيفية تغيّر الكلفة مع Market

Optimumكمية الأجزاء المصنعة، و من ثم إشرح أهمية طريقة التصنيع المثلى

Manufacturing Method.

7Hollow) شركة تدرس نوعين بديلين من عمليات إنتاج حاوية مجوفة من مادة لدائنية لدنة حرارياً

و القولبة Injection Moulding. علماً أن تكاليف القولبة بالحقن Thermoplastic Container

تحسب كالآتي:Rotational Mouldingالدورانية

	Injection Moulding (£)	Rotational Moulding (£)
Fixed Costs		
Installation cost	9000	1000
Die Costs	2000	500
Variable Costs		
Direct labour costs/item	0.3	1.4
Indirect labour costs/item	0.15	0.3
Power costs/item	0.06	0.15
Finishing costs/item	1	0
Material costs/item	0.4	0.4

أ. بالإعتماد على الجدول أعلاه، ما هي الطريقة التي سوف تكون فيها الكلفة فعّالة Cost-Effective إذا كان المطلوب الحصول على:

1. 1000 جزء Items.

2. 100000 جزء Items.

8) إذا علمت أن طريقة القولبة بالحقن Injection Moulding يمكنها إنتاج 50 جزء لكل ساعة، و طريقة القولبة الدورانية Rotational Moulding يمكنها إنتاج 2 جزء فقط لكل ساعة. ماهي دلالة إختيار الطريقة للحصول على مدى واسع من السلع Goods. و ماهو تأثيرها على قرار إختيار الطريقة.

9) إذا علمت أن عمليات الحدادة Forging، السباكة Casting، أو التشغيل من مادة صلبة Machining From the Solid، قد إقترحت كطرق يمكن إستخدامها للحصول على مفاتيح الربط Spanners:

أ. بإستخدام الحدادة، ماهي الطريقة المثلى إذا كان المطلوب الحصول على كميات كبيرة من مفاتيح الربط.

ب. بإستخدام السباكة، ماهي الطريقة المثلى للحصول على كميات كبيرة من مفاتيح الربط.

ج. قارن عمليات الحدادة، السباكة، التشغيل، لإنتاج مفاتيح الربط عندما يكون المطلوب الحصول على كميات كبيرة. ماهي الطريقة التي تبدي أقل كلفة و في نفس الوقت منتج مقبول
Satisfactory Product ؟

الفصل الرابع
معيار الإختيار
Selection Criteria

الفصل الرابع
معيار الإختيار
Selection Criteria

4. 1 مقدمة Introduction

عند دراسة المواد التي ربما تناسب شرط ما، فإن الخواص المطلوبة تؤخذ عادة بنظر الإعتبار. و من هذا المدى الواسع من المواد، ربما تكون هناك مجموعة قليلة من هذه المواد تبدو مناسبة لذلك الشرط، و بالتالي نحتاج الى تحديد ماهي الخواص المثلى Optimum Properties. و في هذا الفصل سوف ندرس الطرق المستخدمة بشكل شائع في تحديد المادة المثلى Optimum Material.

عند إختيار المادة لجزء أو تطبيق معين، فإن الخواص المطلوبة لهذه المادة، يجب أن تؤخذ بنظر الإعتبار بحيث يمكنها تحقيق الوظيفة او الهدف المطلوب منها. إن إختيار المادة لايمكن فصله بأي شكل من الأشكال عن العوامل التالية:

- الشكل Form المطلوب.
- الحجم Size المطلوب.
- التركيب Structure المطلوب.
- الطرق أو العمليات Processes التي بواسطتها يمكن الحصول على ذلك الشكل.

فإذا فرضنا أن الشرط المطلوب يتضمن الحصول على منتج حاوياً على تجويف داخلي Internal Hollow بشكل معين، فإن ذلك سوف يضع أمامنا عدة إحتمالات حول العملية أو الطريقة التي يمكن إستخدامها لتحقيق ذلك الشرط و هذا بدوره سوف يحد من المواد التي يمكن إستخدامها.

2. 4 دليل خاصية المادة Material Property Index

في أغلب الأحيان، نحتاج الى التعامل مع الشروط التي تتطلب مزيج من الخواص، عندما نأخذ بنظر الإعتبار الخواص المطلوبة للمادة. على سبيل المثال، عندما نأخذ بنظر الإعتبار، العضو الإنشائي Structural Member، الذي يخضع الى حمل محوري Axial Load، ربما يكون الهدف الحصول على المادة التي تسمح بأقصى حمل لكل وحدة كتلة من العضو الإنشائي. و كما هو معروف، فإن الكتلة (m) هي ناتج كثافة (μ) وحجم العضو الإنشائي و عند طول مقداره (L) من مساحة المقطع العرضي (A) يكون مقدار الكتلة مساوياً: ($LA\mu$). إن المساحة التي يمكن أن تستخدم تعتمد على إجهاد الخضوع μ_y أي (A=F/ μ_y)، و بالتالي يمكننا القول أن:

فإذا كان (L) ثابتاً، فإن المعامل المستخدم لتحديد الحمل لكل وحدة كتلة هو

$$m = LA\rho = L\rho \frac{F}{\sigma_y}$$

$$\frac{F}{m} = \frac{1}{L} \times \frac{\sigma_y}{\rho} \qquad [1]$$

(μ_y/μ) و يسمى هذا المقدار دليل الأداء Performance Index. إن دليل الأداء، هو عبارة عن مجموعة من الخواص التي تعطي أقصى أداء للمادة عندما تكون تلك الخواص في حالتها القصوى.

والمثال الآخر، يتضمن إختيار المادة لعتبة كابولية Cantilever، طولها (L)، بحيث تكون جساءة Stiffness المادة أقصى ما يمكن بالنسبة لأدنى قيمة من

الكتلة. هذا يعني أقصى حمل أو قوة (F) لكل وحدة إنحراف (y) عند الطرف الحر من العتبة. و بالنسبة للعتبة الكابولية يكون ذلك كالآتي:

$\frac{F}{y}=\frac{F}{FL^3/3EI}$ فإذا فرضنا أن المقطع العرضي هو مربع من الجانب (b) فإن ($I=b^4/12$) و بالتالي:

$$\frac{F}{y}=\frac{3Eb^4/12}{L^3}=\frac{Eb^4}{4L^3} \qquad [2]$$

إن كتلة العتبة (m) هي ($b^2L\ \mu$) حيث إن (μ) هي كثافة المادة. وعليه بإستخدام المعادلة [2] يمكن كتابة الكتلة بالشكل التالي:

$$m=L\rho(\frac{4L^3}{E}\times\frac{F}{y})^{1/2}=2L^{5/2}(\frac{F}{y})^{1/2}\frac{\rho}{E^{1/2}}$$

$$\frac{(F/y)^{1/2}}{m}=\frac{1}{2L^{5/2}}\times\frac{E^{1/2}}{\rho} \qquad [3]$$

فإذا كان الطول (L) ثابتاً، فإن الكتلة تكون عند قيمتها الدنيا و الجساءة تكون عند قيمتها القصوى، و عندئذ يكون المقدار ($E^{1/2}/\ \mu$) عند قيمته القصوى. وهذا يمثل دليل الأداء في حالة العتبة الكابولية.

إن الخطوات المستخدمة في تحديد دليل الأداء تتضمن:

1. كتابة المعادلة للخاصية المطلوبة عند الحالة القصوى أو الدنيا بعبارات خواص المادة و عوامل الشكل الهندسي Geometrical Factors.

2. إختصار الحدود بإستخدام معادلات الخاصية الأخرى أي حدود في تلك المعادلة و أي حدود لاتمثل خاصية أو كمية ثابتة.

3. يمكن بعد ذلك، تحديد الدليل المطلوب الذي يمثل المزيج الناتج للخواص التي تعطي أقصى كمية أو أدنى كمية للخاصية.

إن نسب المقاومة أو إجهاد الخضوع و معامل المرونة الى الكثافة تستخدم بشكل واسع، للتعبير عن دليل الأداء للمواد. إن الهدف هو الحصول على أقصى قيمة لهذه النسب و ذلك للحصول على أفضل أداء بالنسبة لأدنى قيمة من الكتلة. و هذا قد لايؤدي الى الحصول على أفضل أداء في جميع حالات التحميل.
الجدول 1.4 يبين دليل الأداء عند أقصى كمية من نسبة المقاومة الى الكتلة Strength-to-Mass Ratio و الجساءة الى الكتلة Stiffness-to- Mass Ratio عند مدى واسع من حالات التحميل المختلفة، حيث يعتبر حدوث الفشل نتيجة الإفراط الإنحناء أو الإنحراف Excessive Deflection. و يمكن إشتقاق أنواع أخرى من دليل الأداء عندما نتعامل مع القيم لهذه الحالات بوجود الشقوق الأولية Initial Cracks.

إن أنواع دليل الأداء الأخرى التي يمكن إشتقاقها تتضمن الأمثلة التالية:

- النابض Spring بحيث يتميز بأقصى طاقة خزن لكل وحدة كتلة Maximum Energy Storage Per Unit Mass.
- الغشاء Diaphragm الذي يتميز بأقصى إنحراف لكل وحدة ضغط Deflection Per Unit Pressure.
- العتبة Beam التي تتميز بأقصى تردد إهتزازي للإنحناء Maximum Flexural Vibration Frequency.
- الجزء Component بحيث يتميز بأقصى طاقة خزن عند درجة حرارة معينة و زمن معين Maximum Energy Storage for a Given Temperature and Time.
- الجزء بحيث يتميز بأدنى تشوّه حراري Minimum Thermal Distortion.

الجدول 2.4، يبين دليل الأداء المستخدم في الحالات أعلاه.

Component	Maximise Stiffness	Maximise Strength
Tie, i.e. tensile strut	$\frac{E}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$
Beam	$\frac{E^{1/2}}{\rho}$	$\frac{\sigma_y^{2/3}}{\rho}$
Column, compressive strut	$\frac{E^{1/2}}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$
Plate, loaded externally or by self weight in bending	$\frac{E^{1/3}}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$
Cylinder with internal pressure	$\frac{E}{\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$
Spherical with internal pressure	$\frac{E}{(1-v)\rho}$	$\frac{\sigma_y}{\rho}$

Note:E is the modulus of elasticity , ρ is the density, σ_y is the yield stress, v is Poisson's ratio .

الجدول1.4

دليل الأداء للمواد.

Component and attribute	Performance index to be maximise
Spring: energy per unit mass to be maximised	$\frac{\sigma_y{}^2}{E\rho}$
Diaphragm: deflection per unit pressure to be maximised	$\frac{\sigma_y{}^{3/2}}{E}$
Beam: flexural vibration frequency to be maximised	$\frac{E^{1/2}}{\rho}$
Plate: flexural vibration frequency to be maximised	$\frac{E^{1/3}}{\rho}$
Energy storage for given tmperature and time to be maximised .	$\frac{\lambda}{a^{1/2}}$
Thermal distortion to be minimised	$\frac{\lambda}{a}$
Thermal shoak resistance to be maximised	$\frac{\sigma_y}{E\alpha}$

Note: E is the modulus of elasticity , ρ is the density , σ_y is the yied strength (though sometimes the tensile strength is used) , λ is the thermal conductivity . a the thermal diffusivity and α is the coefficient of thermal expansion .

الجدول2.4

دليل الأداء للمواد حسب القيم القصوى.

مثال 1.4

حدّد نوع المادة التي سوف تبدي أفضل طاقة خزن Energy Storage للنابض Spring عندما تكون قيمة الكتلة أقل مايمكن.

فيما يلي ندرج بعض المواد التي يمكن إستخدامها للنوابض و القيم النموذجية لدليل الأداء $2/E\mu \; \mu_y$ ما مبين في الجدول 3.4:

Material	Yield Stress (Mpa)	Tensile Modulus (Gpa)	Density (Mg/m3)	Index ((KJ/Kg)
Spring steel	600	200	7.8	2
Glass	50	70	2	18
Wood	100	10	0.5	2
Nylon	70	2	1	2
Rubber	20	0.004	1	100

الجدول3.4

المواد الممكنة للنوابض.

ومن خلال المعيار المستخدم، نلاحظ أن المطاط Rubber، هو المادة المفضلة، يليه الزجاج Glass. أما الخشب Wood، فإنه يبدو إختيار جيد ولكن يجب تذكّر، الإنحناء Bow، والتقوّس Arrow، و يمكن أن تكون هناك عوامل أخرى تخفض من إستخدام المادة المعينة.

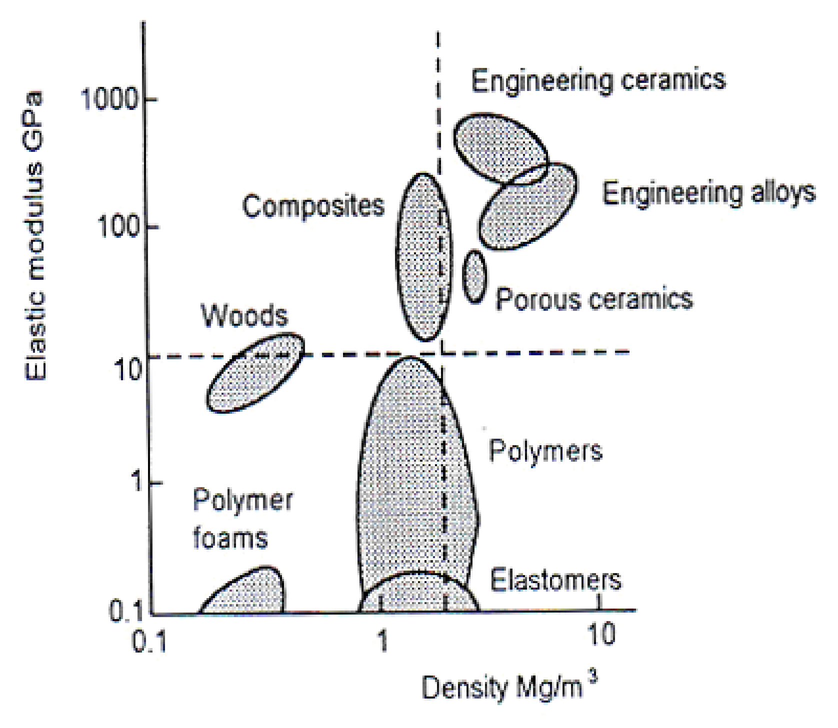
3.4 إختيارالمواد Selecting Materials :

الخواص الحرجة **Critical Properties**

ربما تكون هناك بعض الخواص الحرجة Critical Properties التي بدونها لايمكن إختيار المادة. و عليه، ربما يكون هناك، على سبيل المثال، شرط يتضمن أن تكون المقاومة فوق حد إجهاد معين أو أن النوعية الكهربائية Electrical Resistivity تحت حد معين. وإذا أخذنا بنظر الإعتبار، مثل هذه

الحدود الحرجة Critical Limits، فإن مجموعة قليلة من المواد يمكنها تحقيق ذلك. إن أحد الأساليب المستخدمة في تنفيذ هذه العملية يتضمن إستخدام المخططات Charts التي تعبّر عن العلاقة مابين المواد و خواصها. و كمثال على ذلك، المخطط المبين في الشكل 1.4 حيث أن المواد المشار إليها في المخطط يعبّر عنها من خلال قيمها من معامل المرونة Elastic Modulus والكثافة Density .

و لغرض إختيار المواد التي لها حد أدنى من معامل الشد Tensile Modulus، على سبيل المثال، GPa10 ، يتم رسم خط عبر المخطط يمر عند تلك القيمة و جميع المواد التي تقع فوق هذا الخط تمثل المجموعة القليلة من المواد التي منها يمكن إختيار المادة. و إذا كان لدينا شرط آخر، يتضمن على سبيل المثال، أن تكون الكثافة أقل من $2 Mg/m^3$ ، ففي هذه الحالة، نرسم خط آخر على المخطط عند تلك القيمة من الكثافة، و جميع المواد التي تقع على يسار ذلك الخط، تمثل المجموعة القليلة من المواد لذلك المعيار. إن هذه المجموعة القليلة من المواد عند كلا المعيارين (معيار معامل الشد، و معيار الكثافة) تمثل المواد التي تقع في الربع العلوي الأيسر من المخطط المبين في الشكل



الشكل 1.4

مخطط الخاصة Property chart

فإذا كان المطلوب عتبة كابولية Cantilever تتميز بأقصى جساءة و أدنى كتلة، فإن، المعادلة [3]، تشير الى إستخدام القيمة القصوى للمقدار $C = E^{1/2}/\mu$.

وبالنظر لإستخدام الرسم البياني من النوع log-log Graph في الشكل 1.4 فيمكن التعبير عن ذلك كالآتي:

$$P = E^{1/2} / \rho$$

$$\log P = \tfrac{1}{2}\log E - \log \rho$$

$$\log E = 2\log \rho + 2\log C \qquad [4]$$

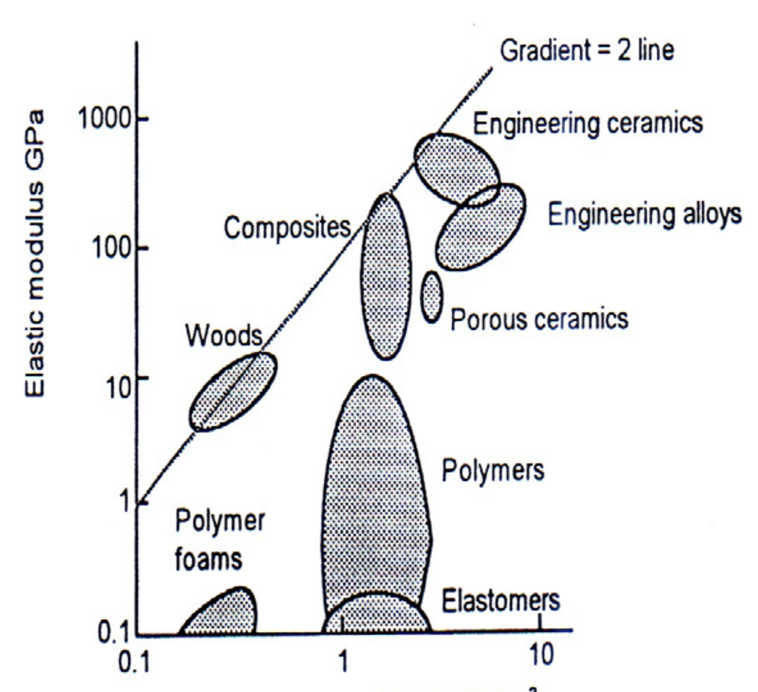
من هنا، بالنسبة لدليل الأداء Performance Index المعين، سيكون لدينا خط مستقيم له ميل مقداره 2 (2) Gradient، و سيكون هناك مجموعة من

الخطوط المستقيمة لها تلك القيمة من الميل أي (2)، أي متشابهة من حيث قيمة الميل و لكن مختلفة من حيث قيمة دليل الأداء (P) و تسمى هذه الخطوط الدليلية للتصميم Design Guidelines. الشكل 2.4 ، يبين أحد هذه الخطوط، أما بقية الخطوط فإنها ستكون موازية لهذا الخط.

إن مثل هذا المخطط، يمكن إستخدامه أيضاً، إذا كانت المادة المطلوبة بشكل عتبة Beam، تكون فيها قيمة الجساءة Stiffness أقصى ما يمكن. و هذا يتطلب تحديد المواد التي تكون فيها قيم (E/μ) أكبر من قيمة حرجة. لو فرضنا، على سبيل المثال، أن مجموعة المواد المطلوبة تكون فيها (E/μ) أكبر من 1000:

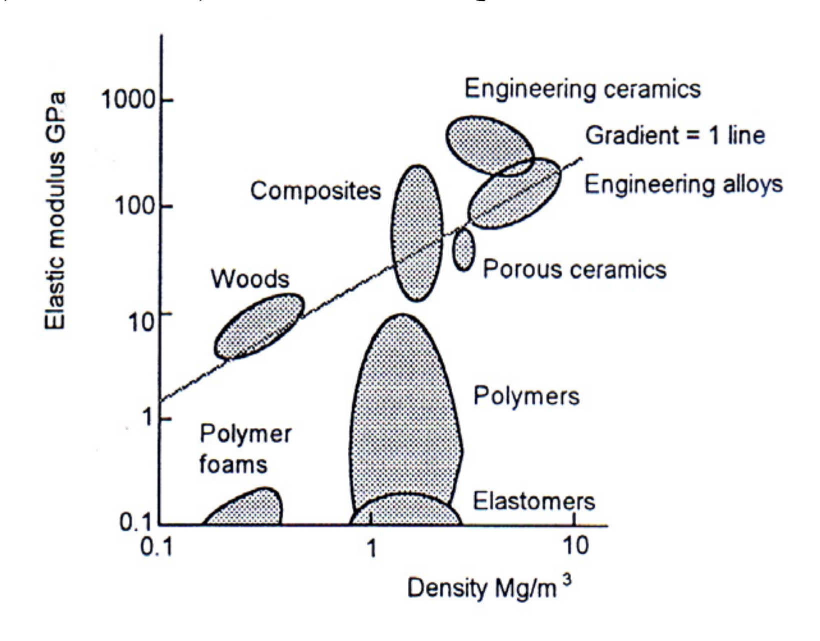
$$\log E - \log \rho = \log 1000$$

$$\log E = \log \rho + 3 \qquad [5]$$



الشكل 2.4 الخط الدليل Guide Line لدليل الأداء $(E^{1/2}/\rho)$ عند قيمتها القصوى.

و هذا سوف يكون عبارة عن خط مستقيم على المخطط، له ميل ثابت مقداره (1) (Gradient=1 line)، و نقطة تقاطع Intercept مع محور- y ‏(log E) مقدارها (3). الشكل 3.4، يبين هذا الخط و مجموعة المواد المشار إليها عند ذلك الخط. وضمن تلك المساحات لكل نوع من المادة، يمكن تحديد النقاط بالنسبة للسبائك الهندسية Engineering Alloys، البولمرات Polymers، الخشب Woods...الخ، وبالتالي يمكن إستخدام المخطط لتحديد أي مادة سوف تطابق المعيار المطلوب. وهناك مدى واسع من هذه المخططات (إنظر الملحق A).



. (P=E/ρ=1000) ... 4.3

الشكل 3.4 الخط الدليلي Guide Line لدليل الأداء (ρ =1000= (P=E/

4.4 إختيار المواد Selecting Materials :

تقدير الإستحقاق Merit Rating

إن المشكلة التي نواجهها عادة عند محاولة تحديد المثلى Optimum Material هي عندما يكون هناك عدد من الخواص المطلوبة أو عدد من معاملات الخاصية (دليل الأداء) Property Indices و عدد من المواد التي تناسب خواص مختلفة بأساليب مختلفة. و بالنتيجة تظهر مشكلة كيفية تحديد المادة التي تحقق أفضل توازن مابين الخواص. إن طريقة تقدير الإستحقاق Merit Rating Method تتضمن إعطاء المادة قيمة إستحقاق نسبي Relative Merit بالنسبة لكل خاصية من الخواص المناسبة. إن التقديرات Ratings تحدّد نسبة الى أفضل مادة التي تعطي أعلى تقدير. على سبيل المثال، (10) أو (100)، أما بقية التقديرات فإنها تعطى بشكل نسبي. على سبيل المثال، نأخذ الموصلية الكهربائية كمثال لتوضيح ذلك، حيث نلاحظ أن النحاس النقي Pure Copper الذي موصليته تقدّر بوالي ($59x10^{-10}$ S/m) يعطى التقدير (100) أما بقية المواد فإنها تقدّر طبقاً لموصليتها كنسبة مئوية من موصلية النحاس، و على هذا الأساس، الألمنيوم الذي موصليته تقدّر بحوالي ($38x10^{-10}$ S/m) يعطى لها التقدير التالي:

$$\left(\frac{38}{59}\right)\times 100 = 64$$

و بعد جمع تقديرات الإستحقاق لكل مادة و لكل خاصية، يمكن تحديد إجمالي تقدير الإستحقاق Overall Merit Rating للمادة بواسطة الحصول على مجموع أو إجمالي أوزان تقديرات الإستحقاق Weighted Merit Rating لكل خاصية. على سبيل المثال، عندما نأخذ بنظر الإعتبار، المواد المطلوبة في

تصنيع فتيلة أو شعيرة مصباح الإضاءة الكهربائي Electric Light Bulb Filament، فإن الخواص المطلوبة تتضمن:

- نقطة الإنصهار Melting Point.
- الموصلية الكهربائية Electrical Conductivity.
- المقاومة Strength.
- المطيلية Ductility.

و هنا، نعطي خاصية نقطة الإنصهار أكثر أهمية (أكثر وزناً) من الموصلية التي بدورها تكون أكثر أهمية من المقاومة و هذه بدورها تكون أكثر أهمية من المطيلية. و كنتيجة لذلك، تكون عوامل الأوزان Weighting Factors لهذه الخواص كالآتي:

$$\text{Melting Point} \times 4$$
$$\text{Conductivity} \times 3$$
$$\text{Strength} \times 2$$
$$\text{Ductility} \times 1$$

4 . 5 إختيار المواد Selecting Materials :

الكلفة لكل وحدة خاصية Cost Per Unit Property

بالنظر لكون الكلفة المنخفضة تمثل في أغلب الأحيان الشرط المطلوب، فإن أحد الأساليب المستخدمة في مقارنة خواص مجموعة من المواد تكون عادة على أساس الكلفة لكل وحدة خاصية أو مجموعة من خواص. إن هذه الطريقة تكون مفيدة بشكل خاص عندما تكون هناك خاصية أو مجموعة من الخواص

تمثل المتطلب الرئيسي Main Requirement. الجدول 44. يوضح بيانات تقدير الكلفة النسبية Relative Costing في بعض المواد.

Material	Relative Cost per Kg	Material	Relative Cost per Kg
Metals		**Polymers**	
Mild steel bar (black)	1	Polyethylene	3
Mild steel bar (bright)	1.3	Polypropylene	3
Mild steel sheet	1.4	Polystyrene	3
Medium-carbon steel	1.6	PVC	6
High-carbon steel bar	2.3	ABS	12
Cast iron casting	2.4	Phenolics	12
Manganese steel bar	2.5	Acrylics	12
Brass sheet	5.1	Cellulose acetate	15
Copper sheet	8.3	Acetals	15
Stainless steel sheet	8.5	Polycarbonate	36
Aluminium bar	8.5	Nylons	45
Nickel chrome steel bar	4.6	Polyurethane	60
Brassbar	6.6	PTFE	90
Aluminium sheet	7.1	Fluorosilicones.	240
Aluminium casting	9.6		
Stainless steel bar	9.6		
Phosphor bronze bar	16		
Monel bar	20.6		

الجدول1.4
الكلفة النسبية للمواد

وبصورة عامة، يمكننا دراسة الكلفة من خلال التكاليف الأساسية Basic Costs التي تتضمن:

- تكاليف المواد الأولية Costs of Raw Materials.
- تكاليف منتجات التصنيع Manufacturing Products Costs.
- تكاليف عمر و صيانة المنتج النهائي Life and Maintenance Costs of Finished Product.

و يعبّر في أغلب الأحيان عن مقارنة التكاليف الأساسية للمواد على أساس:

- الكلفة لكل وحدة وزن Cost Per Unit Weight.
- أو الكلفة لكل وحدة حجم Cost Per Unit Volume.

الجدول 5.4 يبين الكلفة النسبية Relative Cost في بعض المواد. أضف الى ذلك، أنه من المهم في أغلب الأحيان مقارنة كلفة المواد على أساس:

- الكلفة لكل وحدة مقاومة Cost Per Unit Strength.
- أو الكلفة لكل وحدة جساءة Cost Per Unit Stiffness.

بالنسبة للحجوم المتساوية من المادة.

وهذا يكون ذات جدوى، عندما نريد معرفة على سبيل المثال، كم ستكون كلفة العتبة Beam التي سوف يكون لها قيمة معينة من المقاومة Strength أو الجساءة Stiffness. و لتوضيح ذلك، نأخذ المثال التالي: (لو فرضنا أن لدينا عتبة Beam حجمها $m^3$1، فإذا كانت مقاومة الشد Tensile Strength لمادة العتبة هي MPa500 و الكلفة لكل m^3 هي £800، فإن الكلفة لكل MPa من المقاومة سوف تكون 500=£1.6800/).

Material	Relative Cost/Kg	Relative Cost/m³
Cobalt	100	112
PTFE	39	11
Nickel	28	32
Chromium	26	24
Tin	19	18
Titanium	17	10
Brass sheet	16	17
Al-Cu alloy sheet	14	5.3
Nylon 66	12	1.8
Phosphor bronze ingot	10	12
Magnesium ingot	9.2	2.1
Acrylic	8.9	1.4
Copper tubing	8.7	10
ABS	8.3	1.1
Aluminium ingot	4.3	1.5
Polystyrene	3.6	0.5
Zinc ingot	3.6	3.3
Polyethylene (HDPE)	3.4	0.43
Polyprpylene	3.2	0.34
Natural rubber	3.1	0.5
Polyethylene (LDPE)	2.3	0.29
PVC, rigid	2.3	0.43
Mild steel sheet	1.9	1.9
mild steel ingot	1	1
Cast iron	0.8	0.79

الجدول2.4

الكلفة النسبية للمواد نسبة إلى مسبوكة الفولاذ

إن تكاليف التصنيع Manufacturing Costs سوف تعتمد على الطريقة أو العملية المستخدمة. حيث تتطلب بعض العمليات إنفاق كمية كبيرة من رأس المال و بالتالي يمكن أن تستخدم لإنتاج أعداد كبيرة من ذلك المنتج عند كلفة منخفضة نسبياً لكل جزء Low Cost Per Item. بينما تتطلب عمليات أخرى، إنفاق كمية صغيرة من رأس المال و لكن كلفة كبيرة لكل وحدة من المنتج Large Cost Per Unit Product. أما كلفة صيانة الجزء Cost of Maintenance فإنها تكون في أغلب الأحيان، عامل مهم في إختيار المواد الهندسية، فالعامل الشائع في العديد من المعادن يتضمن الحاجة الى إجراء الطلاء السطحي Surface Coating و ذلك لحماية المعدن من التآكل نتيجة التعرّض الى أجواء التآكل. و كمثال على ذلك، صدأ سبائك الفولاذ Rusting of Steels كما هو الحال

في صدأ سكك الحديد Railway Bridge و بالتالي يتطلب إعادة الطلاء لتلافي عملية التآكل.

مثال 4. 1

إستخدم البيانات التالية، لمقارنة الكلفة لكل وحدة مقاومة Cost Per Unit Strength للمواد الهندسية التالية التي لها حجم متساوي.

Material	Cost Per Kg (£)	Density (Kg/m^3)	Strength (Mpa)
Low-carbon steel alloy	0.1	7800	1000
Aluminium-manganese alloy	0.22	2700	200

I. سبيكة الفولاذ المنخفض الكاربون Low Carbon Steel Alloy : إن حجم (1Kg) من الفولاذ يمكن حسابه كالآتي:

$$\frac{1}{7800} = 0.000128 m^3$$

و بالتالي الكلفة لكل m^3 Cost Per m^3 تحدّد كالآتي:

$$\frac{0.1}{0.000128} = £780$$

أما الكلفة لكل MPa من المقاومة فيمكن تحديدها بالشكل التالي:

$$\frac{780}{1000} = £0.78$$

II. سبيكة الألمنيوم- مغنيسيوم Aluminium-Manganese Alloy : حيث يمكن إجراء الحسابات بالشكل التالي:

$$\frac{1}{2700} = 0.00037 m^3$$

$$\frac{0.22}{0.00037} = £590 .$$

وعلى الرغم من ان الكلفة لكل (Kg) من سبيكة من الألمنيوم- مغنيسيوم هي:

أكبر مقارنةً مع سبيكة الفولاذ، نتيجة الكثافة المنخفضة لسبيكة Al-Mg، فإن

الكلفة لكل m^3 هي أقل. و بالنسبة الكلفة لكل MPa من المقاومة فيمكن أن تحدّد بالشكل التالي:

وعليه، نستنتج من مقارنة المقاومة للمواد أعلاه، التي لها حجوم متساوية، أن إستخدام الفولاذ المنخفض الكاربون سوف يكون أقل كلفة مقارنة مع سبيكة الألمنيوم- مغنيسيوم.

المسائل Problems

1. ماهي المعايير المستخدمة بشكل شائع في إختيار المواد الهندسية؟

2. ماهي أهمية إستخدام عامل الكلفة النسبية؟

3. ماهي الخطوات المتبعة في تحديد خطوط الدليلية للتصميم Design Guidelines في مخططات إختيار المواد الهندسية Materials Selection Charts.

4. ماهي الخطوات المتبعة في تقدير الإستحقاق والأوزان للخاصية المناسبة.

الفصل الخامس

دراسة حالات
Cases Study

الفصل الخامس
دراسة حالات
Cases Study

5. 1مقدمة Introduction

إن إحدى التقنيات الفعّالة المستخدمة في تعلّم مبادئ التصميم هي طريقة دراسة الحالة Case Study Method. حيث تتضمن هذه التقنية إيجاد التحليل المفصّل حول المشاكل الهندسية الفعلية بحيث يمكن للطالب أن يلاحظ بوضوح الخطوات المطلوبة في عملية صنع القرار. يتضمن هذا الفصل دراسة مجموعة من الحالات أو التطبيقات الهندسية التي يتم فيها إختيار المادة الهندسية المثلى Optimum Engineering Materials بإستخدام معايير إختيار المادة الهندسية التي تم التطرق إليها في الفصول السابقة. وهذه الحالات تتضمن:

- الموصلات الكهربائية Electrical Conductors.
- غشاء الطائرة المعدني Aircraft Skins.
- عمود إسطواني يخضع الى إجهاد الإلتواء A Torsionally Stressed Cylindrical Shaft.
- مضرب التنس Tennis Racket.
- قنينة المشروب الغازي Fizzy Drink Bottle.
- ريش التوربين الغازي Gas Turbine Blades.
- إختيار مادة العدة Tool Material Selection.
- مواد المحامل Bearing Materials.

- هيكل السيارة Car Bodywork.
- الأجزاء الصغيرة للدمى (الألعاب) Small Components for Toys.

2.5 الموصلات الكهربائية Electrical Conductors

إن الكبلات الكهربائية Electrical Cables، المنزلية والصناعية تتطلب عادة مساحة مقطع عرضي صغيرة وأقل مايمكن من المقاومة Resistance أي مقاومة نوعية كهربائية Resistivity منخفضة وبالتالي موصلية كهربائية Electrical Conductivity عالية. أضف الى ذلك، أنها يجب أن تتميز بقابلية على المعالجة بشكل أطوال طويلة ومستمرة ومقاومة للكسر. إن مثل هذه الشروط، يمكن توفرها في المواد العالية المطيلية التي يمكن أن تسحب بأطوال معينة. أضف الى ذلك، أن الكبلات يجب أن تكون مرنة وقابلة على الإنحناء والثني بشكل زوايا دائرية من دون أن تخضع للكسر ويجب أن تكون منخفضة الكلفة.

إن شرط الموصلية العالية، يقتصر عادة على المعدن لأن كل من المواد البوليمرية والسيراميكية هي بصورة عامة عوازل. أما شرط الموصلية الكهربائية العالية جداً فإن تحققه يكون مقتصراً على المعادن التي تتضمن، الفضة Ag، النحاس Cu، الألمنيوم Al، حيث أن هذه المعادن يجب أن تتميز بنقاوة عالية High Purity، وأن تكون في الحالة الملدّنة Annealed Condition. الجدول1.5 يبين الموصلات الكهربائية لهذه المعادن عند هذه الظروف.

Metals	Conductivity 10^{10} (S/m)
Silver	68
Copper	64
Aluminium	40
Iron	11

الجدول 1.5 الموصلية للكهربائية للمعادن النقية عند $0^{\circ} C$

وعندما نأخذ الكلفة بنظر الإعتبار، فإن ذلك، سوف يؤدي الى إستبعاد الفضة من عملية الإختيار، وبالتالي يكون النحاس الإختيار الأمثل Optimum Choice. بعد إتخاذ القرار حول النحاس، السؤال الآخر، سوف يتضمن، أي سبيكة من النحاس سوف يتم إختيارها؟ الجدول 2.5.يبين الموصلية الكهربائية في بعض سبائك النحاس.

Bs ref.	Metal	IACS Conductivity (%)
C101	Electrolytic tough-pitch h.c. copper	101.5-100
C103	Oxygen-free h.c. copper	101.5-100
C105	Phosphorous deoxidised aresenical copper	50.0-35.0
C108	Copper-cadmium	80.0-92.0
CZ102	Red brass	37
CZ106	Cartridge brass	27
NS101	Leaded nickel silver	7
PB101	3%Phosphors bronze	15.0-25.0

الجدول 2.5

الالموصلية الكهربائية للنحاس وسبائكة

إن الموصلية الكهربائية التي يعبّر عنها بمقياس (IACS) حيث أن القيمة (100%) تناظر موصلية النحاس الملدّن Annealed Copper عند ^{o}C20. وعلى أساس الموصلية، فإن النحاس أفضل موصلية من سبائكه. ومن خلال الجدول 25. تعتبر الأنواع C103, C101 هي المفضّلة. وكلاهما يتميز بنفس خواص الشد مع مطيلية عالية، وإستطالة مئوية Percentage Elongation تتراوح مابين (50-60%). إن إختبارات الإنحناء تشير الى أن كلاهما، يمكن أن ينحني عند 180^{o}. وكلاهما يمكن تشكيله بسهولة وبالتالي يمكن إستخدام عملية السحب Drawing للحصول على أسلاك طويلة. إن الفرق الأساسي مابين الإثنين يكمن في الكلفة، حيث أن C101 أقل كلفة من C103، وعليه عند إختيار الكبلات الكهربائية سيكون C101 هو المفضّل.

إن مقاومة الشد للنحاس مثل C101 تتراوح في المدى (200-400 MPa). وبالنسبة لكبلات خط نقل القدرة الكهربائية الرئيسية Major Power Transmission Line Cables تكون هذه المقاومة غير كافية. وعندما تعلّق هذه الكبلات مابين الأبراج Pylons فإنها سوف تخضع للكسر نتيجة وزنها. إن إستخدام سبيكة نحاس حاوية على Cadmium1 % سوف يكون لها مقاومة أعلى حوالي (250-450 MPa) بعد أن تخضع الى التلدين Annealing. وتصل الى (620-700 MPa) عندما تخضع الى التصليد Hardening. أما الموصلية فإنها تكون بحدود (80-92% IACS).

و بالنسبة لإرتخاء أو هبوط الكبل بفعل الثقل Cable Sagging نتيجة الوزن، فإن المطلوب هو القيمة العالية للمقاومة النوعية Specific Strength أي القيمة العالية للنسبة (مقاومة/كثافة) (Strength/Density). وبالنسبة لسبيكة نحاس-كادميوم Cu-Cd Alloy تصل المقاومة النوعية الى حوالي 70 79-MPa/Mgm^{-3}. إن قيم المقاومة النوعية العالية من دون التأثير الكبير على الموصلية الكهربائية يمكن الحصول عليها في سبائك الألمنيوم. إن المادة المستخدمة بشكل شائع في الكبلات المعلّقة Overhead Cables المستخدمة في نقل القدرة الكهربائية. هي سبيكة الألمنيوم الحاوية على 5%Mg0. و5%Si0.. وهي تخضع عادة الى الى معاملة حرارية بحيث تؤدي الى الحصول على مقاومة مقدارها MPa260 ومقاومة نوعية مقدارها 96MPa/Mgm^{-3} . أما الموصلية الكهربائية فإنها تكون بحدود IACS55 %. إن هذه المقاومة النوعية تكون عادة غير كافية بالنسبة لكبلات القدرة الرئيسية التي يجب أن تمتد الى مسافات كبيرة. ولهذا تستخدم عادة موصلات الألمنيوم الحاوية على قلب فولاذي Steel-Cored Aluminium بهذا الخصوص، الألمنيوم بدلاً من النحاس بسبب كثافته المنخفضة.

3.5 غشاء الطائرة المعدني Aircraft Skin

إن أجسام الطائرات Aircraft Fuselage يتم إنشاؤها عادة بشكل مقاطع على شكل H, T, L حيث يتم عادة ربط أو لصق غشاء معدني Metal Skin عليها. وإحدى الأساليب المستخدمة في دراسة جسم الطائرة Fuselage هو شكلها الإسطواني كما ضغط As-Pressurised Cylinder. إن عامل الكتلة Mass يعتبر من العوامل المهمة بالنسبة للمواد المستخدمة في الطائرة، حيث أن الهدف هو الحصول على أدنى قيمة ممكنة للكتلة. وعليه، كما مبين في الجدول 1.4 ، بالنسبة للإسطوانة المضغوطة Pressurised Cylinder، دليل الأداء الذي يمكن إستخدامه في تحديد المواد هو $\left(\mu_{y}/\mu\right)$. أي المقاومة النوعية Specific Strength. إن قائمة الخواص المطلوبة تتضمن مايلي:

- خفة الوزن Light Weight : كلما تكون الطائرة خفيفة الوزن كلما يزداد مدى السرعة والحمل الآجر Payload (الحمل الذي يدفع عليه أجر).
- المعولية Reliability : إن فشل الطائرة، يضع الطائرة موضع الخطر. فالمعولية لايمكن أن تضمن بإستخدام معامل أمان Safety Factor كبير في التصميم لأن هذا سوف يؤدي الى زيادة الوزن. وعليه، المعولية يجب أن تتضمن السيطرة النوعية المشدّدة للمواد والتصميم الجيد.
- إجهاد الصمود أو الخضوع النوعي العالي High Specific Proof or Yield Stress : إن إجهاد الصمود (0.2%) لكل وحدة كتلة أو إجهاد الخضوع لكل وحدة كتلة يجب أن يكون أعلى مايمكن بالنسبة لدرجات الحرارة التي يواجهها غشاء الطائرة Aircraft Skin خلال الطيران.

- مقاومة الكلال العالية High Fatigue Strength : في الطيران، وخلال الإقلاع والهبوط تخضع الطائرة عادة الى إجهادات إهتزازية وصدمية.
- مقاومة الزحف العالية High Creep Resistance : يجب أن تكون مقاومة الزحف عالية لأن غشاء الطائرة يتعرض عادة الى درجات حرارية معينة خلال الطيران.
- مقاومة التآكل الجيدة Good Corrosion Resistance : إن فشل المادة يجب أن لا يحدث نتيجة التآكل، وبشكل خاص عندما نأخذ بنظر الإعتبار الطائرة التي تحلّق في الأوساط البحرية Marine Environment.
- سهولة تشكيل الألواح Ease Forming Sheet : إن الألواح المستخدمة في الأغشية يجب أن تتميز بسهولة التشكيل الى الأشكال المطلوبة بالنسبة للأجزاء المختلفة في السطح. وهذا يعني مطيلية جيدة، على الرغم من حدوث الإصلاد بعد التشكيل.
- سهولة ربط الألواح Ease of joining Sheets : إن الألواح تتطلب عادة إستخدام عملية اللحام أو البرشمة للحصول على السطوح الكبيرة المطلوبة.
- الكلفة Cost: إن المادة التي لها أدنى كلفة ممكنة بعد عملية المعالجة هي المادة المطلوبة، على أن تناسب الخواص المطلوبة.

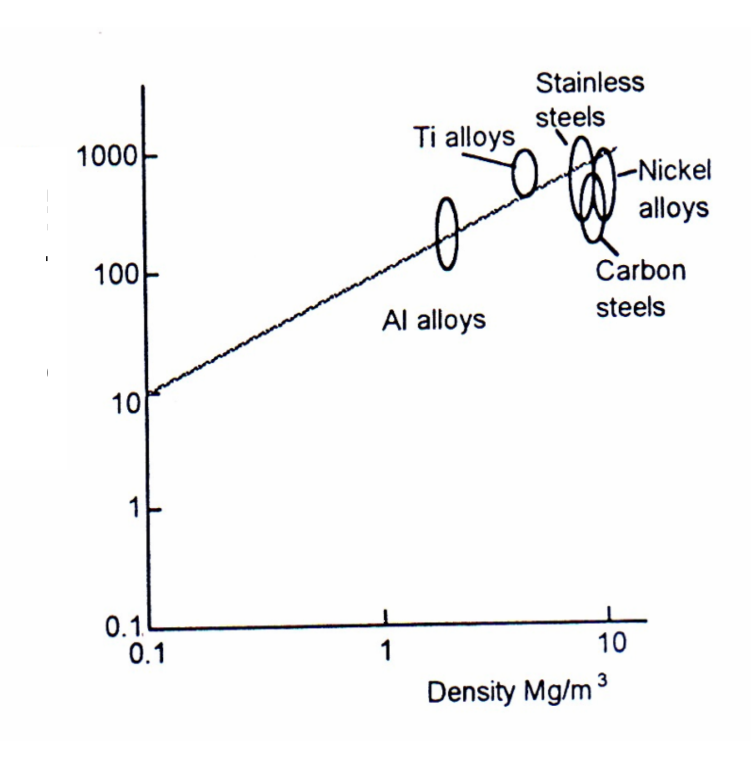
إن سرعة الطائرة التي تصل الى حوالي m/s500 تؤدي الى رفع درجة حرارة الغشاء بحدود ^{o}C120. بينما السرع مافوق الصوتية Supersonic Speeds التي تكون بحدود m/s800 تؤدي الى رفع درجة الحرارة بحدود

^{o}C300. إن الطائرة العسكرية Military Aircraft يمكن أن تحتفظ بسرعتها العالية التي تصل الى m/s2000 وتؤدي الى رفع درجة حرارة الغشاء الى ^{o}C500. وعليه، السرعة المستخدمة في الطائرة تحدّد مدى درجة الحرارة الذي عنده يجب أن تتميز بالخواص المطلوبة.

إن المواد الممكنة يمكن أن تتضمن:

- سبائك الألمنيوم Aluminium Alloys.
- سبائك الفولاذ الكاربوني Carbon Steels.
- سبائك الفولاذ المقاوم للصدأ Stainless Steels.
- سبائك النيكل Nickel Alloys.
- سبائك التيتانيوم Titanium Alloys.

الشكل 5. 1 يبين هذه المواد على مخطط الخواص Properties Chart مابين المقاومة Strength والكثافة Density. أما الجدول 5.3، فإنه يبين أنواع الخواص الممكنة لهذه المواد عند درجة حرارة الغرفة. بالنسبة لطائرة المسافرين الإعتيادية Passenger Aircraft ذات السرع دون الصوتية، فإن جميع المواد تكون ملائمة على أساس درجات الحرارة القصوى التي يمكن ان تستخدم عندها. وعلى أساس إجهاد الخضوع النوعي Specific Yield Stress، فإن كل من الألمنيوم والتيتانيوم يكون مفضلاً. أما على أساس كلفة المادة، فإن سبائك الألمنيوم تكون مفضلة على سبائك التيتانيوم. إن كلفة المعالجة بالنسبة لسبائك التيتانيوم هي أيضاً أعلى من سبائك الألمنيوم. إن النقطة الجديرة بالإنتباه، هي أن سبائك الفولاذ الكاربوني تكون غير مناسبة على الرغم من إنخفاض كلفتها لأن إجهاد الخضوع النوعي لها منخفض جداً بسبب كثافتها العالية.



. (σ_y/ρ) ♦◖█ ╚♣▫ ♥♣╓╖♣░╖♣╖%▄ ╓%╓♣░░╖♪ 5.1 fi♣▀♣╖

Material	Density (Mg/m^3)	Yield Stress (Mpa)	Specific Yield Strength ($Mpa/Mg\ m^{-3}$)	Max. Use Temperature (^oC)	Relative Cost Per Unit Sheet Area
Aluminium alloys	2.8	200-400	71-140	200	2
Carbon steels	7.8	200-500	26-64	350	1
Stainless steels	7.7	300-1000	39-130	700	6
Nickel alloys	8.9	300-900	34-100	1000	6
Titanium alloys	4.5	700-1100	156-244	600	10

الجدول 3.5 الخواص النموذجية للمواد المرشحة للاختيار.

و للحصول على إجهاد الخضوع العالي لسيكة الألمنيوم التي تم إختيارها، فإنها يجب أن تكون سبيكة مطروقة قابلة للمعاملة الحرارية Heat Treatable Wrought Alloy، وذلك للسماح للمادة بالتشكيل في الحالة الطرية Soft Condition قبل تصليدها بواسطة الإصلاد بالترسيب Precipitation Hardening. والسبيكة الممكنة سوف تكون (4%Cu-0.8%Mg, 0.5%Si-0.7%Mn). وعندما تكون هذه السبيكة طرية يكون إجهاد الصمود (0.2%) لها مقداره MPa90 ويكون MPa400 عندما تكون صلدة Hard. وهناك مشكلة رئيسية نواجهها في حالة سبائك الألمنيوم، وهي أنها لاتؤدي الى الحصول على وصلات لحام جيدة، ولهذا نلجأ الى إستخدام البراشيم Rivets لربط الألواح.

أما بالنسبة للطائرة ذات السرع العالية، فإن سبيكة الألمنيوم تكون عادة غير مناسبة، لأنها لاتحتفظ بخواصها الميكانيكية الجيدة عند درجات الحرارة العالية. وفي هذه الحالة يفضل إستخدام التيتانيوم، على الرغم من كلفته العالية. وبخلاف الألمنيوم، يمكن بواسطة التيتانيوم الحصول على وصلات لحام جيدة. الجدول 45.، يبين السبائك الممكنة وخواصها.

Alloy Composition (%)	Condition	Yield Stress (Mpa)			
		20°C	300°C	400°C	500°C
90Ti, 8Al, 1Mo, 1V	Annealed	970	630	570	520
	Solution treated +aged	1200	780	710	650
90Ti, 6Al, 4V	Annealed	940	660	580	430
	Solution treated +aged	1100	710	630	490

الجدول 4.5 خواص سبائك التيتانيوم.

وعلى أساس الخواص الميكانيكية، السبيكة الأولى في الجدول 45.، تبدو الإختيار المفضل. ولكن، هذه السبيكة حسّاسة للتآكل الإجهادي Stress Corrosion، في أوساط الماء المالح Salt Water Environment. إن الطائرة التي تطير فوق البحر تواجه عادة الرطوبة الحاوية على الأملاح وبالتالي السبيكة الثانية لاتعاني من هذه المشكلة تعتبر الإختيار المفضّل. أما بالنسبة للسرع العالية جداً، فإن الإختيار يقتصر على سبائك النيكل Nickel Alloys، لأنها تتميز بخواص ميكانيكية جيدة عند درجات الحرارة العالية.

4.5 عمود إسطواني يخضع الى إجهاد الإلتواء

A Torsionally Stressed Cylindrical Shaft

إن الجزء الذي تم إختياره في هذه الدراسة هو عمود أسطواني مصمت (غير مجوّف) Solid Cylindrical Shaft يخضع الى إجهاد الإلتواء Tortional Stress. إن مقاومة هذا الجزء سوف يتم دراستها بشكل مفصّل، أما المعيار المستخدم في إختيار المادة فإنه يتضمن الحصول على أقصى مقاومة Maximum Strength بالنسبة الى أدنى كتلة Minimum Mass من المادة وعند أدنى كلفة Minimum Cost لتلك المادة. أما المعاملات والخواص الأخرى التي يمكن أن تكون مهمة في عملية الإختيار، فإنها أيضاً سوف يتم مناقشتها بشكل موجز.

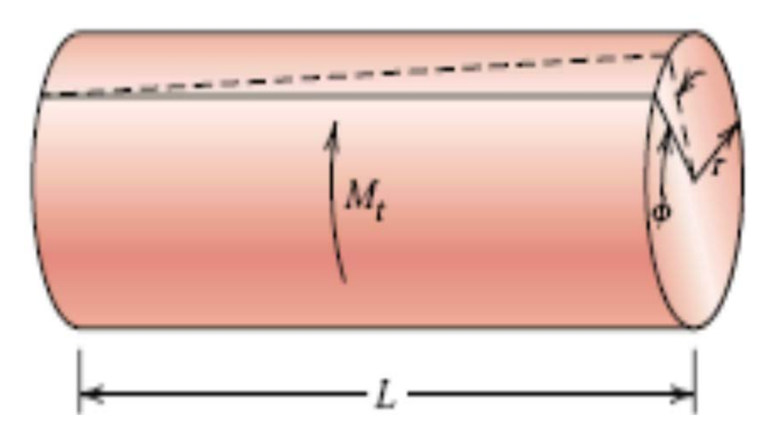
المقاومة Strength

بالنسبة لهذه الخاصية، سنقوم بالحصول على معيار الإختيار بالنسبة للمواد الخفيفة والقوية Light and Strong Materials التي يمكن إستخدامها في ذلك العمود. وفي البداية، نفرض أن كل من عزم الإلتواء Twisting Moment وطول العمود Shaft Length معلوماً، بينما نصف القطر (أو مساحة المقطع العرضي) للعمود يمكن أن يكون متغيراً. ويمكن الحصول على التعبير الرياضي لكتلة المادة المطلوبة من خلال:

- عزم الإلتواء Twisting Moment.
- طول العمود Shaft Length.
- كثافة المادة Material Density.
- مقاومة المادة Material Strength.

وبإمكاننا تقييم الأداء Performance من خلال هذا التعبير الرياضي أي الحصول على أقصى مقاومة للعمود (الذي يخضع الى إجهاد الإلتواء) نسبة الى كل من الكتلة والكلفة.

نفرض أن طول العمود الإسطواني هو (L) ونصف قطره هو (r) كما مبين في الشكل 2.5.



الجدول 2.5 عمود إسطواني Cylindrical Shaft يخضع إلى عزم الالتواء

إن تطبيق عزم الإلتواء (عزم الدوران) Twisting Moment (Torque) (M_t) يؤدي الى الحصول على زاوية إلتواء Twist Angle مقدرها (μ□). إن إجهاد القص (μ) Shear Stress عند نصف قطر مقداره (r) يمكن تعريفه من خلال المعادلة التالية:

$$\tau = \frac{M_t}{J} \qquad [1]$$

حيث أن، J هو عزم القصور الذاتي القطبي Polar Moment of Inertia والذي يمكن حسابه في حالة الإسطوانة المصمتة Solid Cylinder:

$$J = \frac{\pi r^4}{2} \qquad [2]$$

وبالتالي:

$$\tau = \frac{2\,M_t}{\pi\, r^3} \qquad [3]$$

إن التصميم السليم Safe Design للعمود يتضمن قدرة العمود على تحمل عزم الإلتواء، من دون الخضوع للكسر. ولغرض الحصول على معيار إختيار المواد في حالة المادة الخفيفة الوزن والقوية، يتم إستبدال (μ) في المعادلة [1] بمقاومة القص للمادة Shear Strength of Material (μ_f) مقسوماً على معامل الأمان (N) Factor of Safety :

$$\frac{\tau_f}{N} = \frac{2\,M_t}{\pi\, r^3} \qquad [4]$$

الآن، من الضروري، أن نأخذ بنظر الإعتبار كتلة المادة Material Mass.

إن كتلة المادة (m) Mass لأي كمية معينة من المادة هي ناتج الكثافة (μ) Density والحجم Volume. إن حجم الإسطوانة يمثل $(\mu r^2 L)$ وبالتالي:

$$m = \pi\, r^2\, L\, \rho \qquad [5]$$

و يمكن التعبير عن نصف القطر بعبارات الكتلة:

$$r = \sqrt{\frac{m}{\pi\, L\, \rho}} \qquad [6]$$

إن تعويض قيمة (r) في المعادلة [4] يؤدي الى الحصول على:

$$\frac{\tau_f}{N} = \frac{2\,M_t}{\pi\left(\sqrt{\frac{m}{\pi\,L\,\rho}}\right)^3} = 2\,M_t\,\sqrt{\frac{\pi\,L^3\,\rho}{m^3}} \qquad [7]$$

إن حل هذه المعادلة بالنسبة للكتلة (m) يؤدي الى:

$$m=(2N\,M_t)^{2/3}\,(\pi^{1/3}\,L)\left(\frac{\rho}{\tau_f^{\,2/3}}\right) \qquad [8]$$

إن المعاملات الموجودة في الجانب الأيمن من المعادلة يمكن أن تصنّف الى ثلاثة مجاميع:

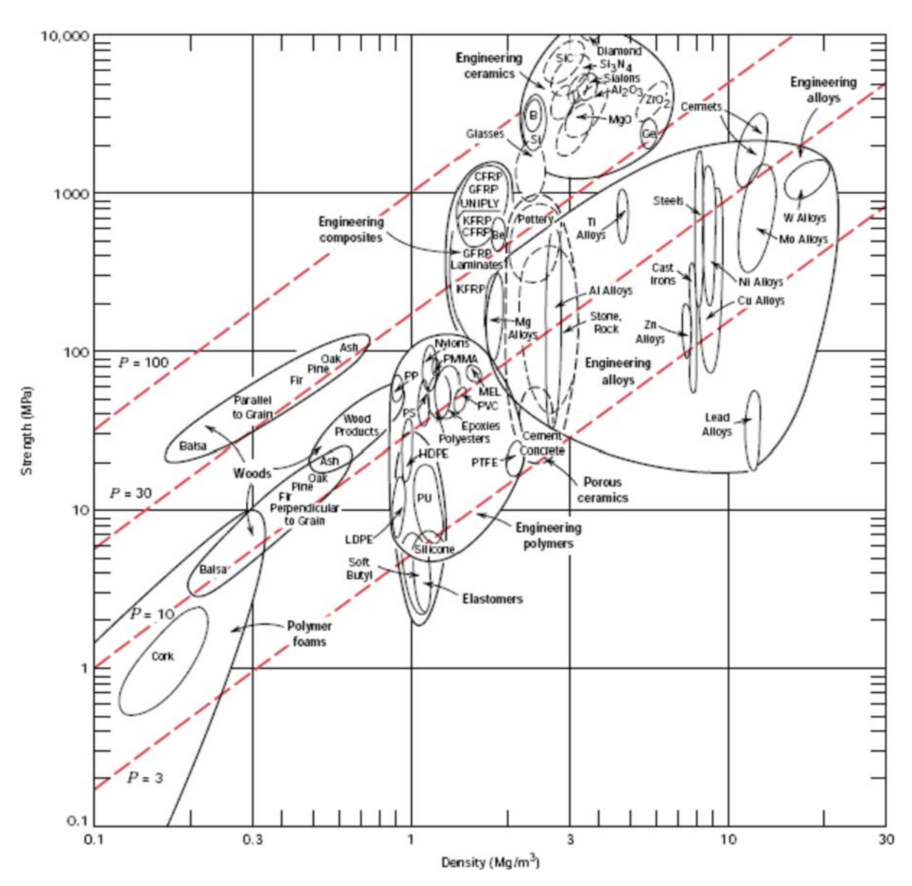
1. **المجموعة الأولى:** تتضمن (N,M_t) حيث تشير الى دالة الأمان Safe Function للعمود.
2. **المجموعة الثانية:** تضمن (L) الذي يمثل المعامل الهندسي Geometric Parameter.
3. **المجموعة الثالثة:** تتضمن خواص المواد أي كثافة (μ) ومقاومة المادة (μ_f).

إن نتيجة المعادلة [8] تشير الى أن أفضل المواد التي يمكن إستخدامها في حالة العمود الخفيف الوزن Light Shaft والذي يتحمل عزم الإلتواء وبأمان هي تلك المواد التي لها نسبة منخفضة من $\left(\tilde{\mu}\,\mu_f^{\;2/3}\right)$. ويمكن التعبير عن ملائمة

المادة Material Suitability من خلال دليل الأداء Performance Index (P)، الذي يمثل مقلوب النسبة $\left(\tilde{\mu}\,\mu_f^{\;2/3}\right)$ أي:

$$P = \frac{\tau_f^{\;2/3}}{\rho} \qquad [9]$$

و بالنسبة للعمود الذي يخضع الى إجهاد الإلتواء، يتطلب الأمر إستخدام المادة التي تعطي أكبر دليل أداء ممكن Large Performance Index. وبهذا الخصوص، من الضروري أن نتفحص دليل الأداء لمجموعة من المواد. ويمكن إجراء ذلك بسهولة، من خلال الإستفادة من مخططات إختيار المواد Materials Selection Charts. وهذه المخططات كما ذكرنا، عبارة عن مخططات تتضمن العلاقة مابين قيم خاصية معينة للمادة مقابل خاصية أخرى. ويعبّر عن المحاور عادة بالمقياس اللوغارتمي Logarithmic Scale مقسمة الى خمسة أجزاء بحيث تتضمن جميع خواص المواد في ذلك المخطط. على سبيل المثال، في حالة العمود الذي يخضع الى إجهاد الإلتواء، فإن المخطط يمثل لوغارتم المقاومة مقابل لوغارتم الكثافة كما مبين في الشكل .(5.3)



الشكل 3.5 مخطط اختيار المواد، المقاومة مقابل الكثافة. حيث يوضح الخطوط التحليلية للتصميم عند $(MPa)^{2/3}m^{3}$ 100 ، 30، 10، 3، والتي لها ميل مقداره (3/2).

ويمكن أن نلاحظ من الشكل بأن المواد مثل (المواد البوليمرية الهندسية Engineering Polymers، الخشب Woods...الخ) تتجمع معاً وتحاط بطوق ذات خط بارز Bold-Line بينما تحاط الأصناف الفرعية لهذه المجاميع من المواد بخط ناعم Fine Line.

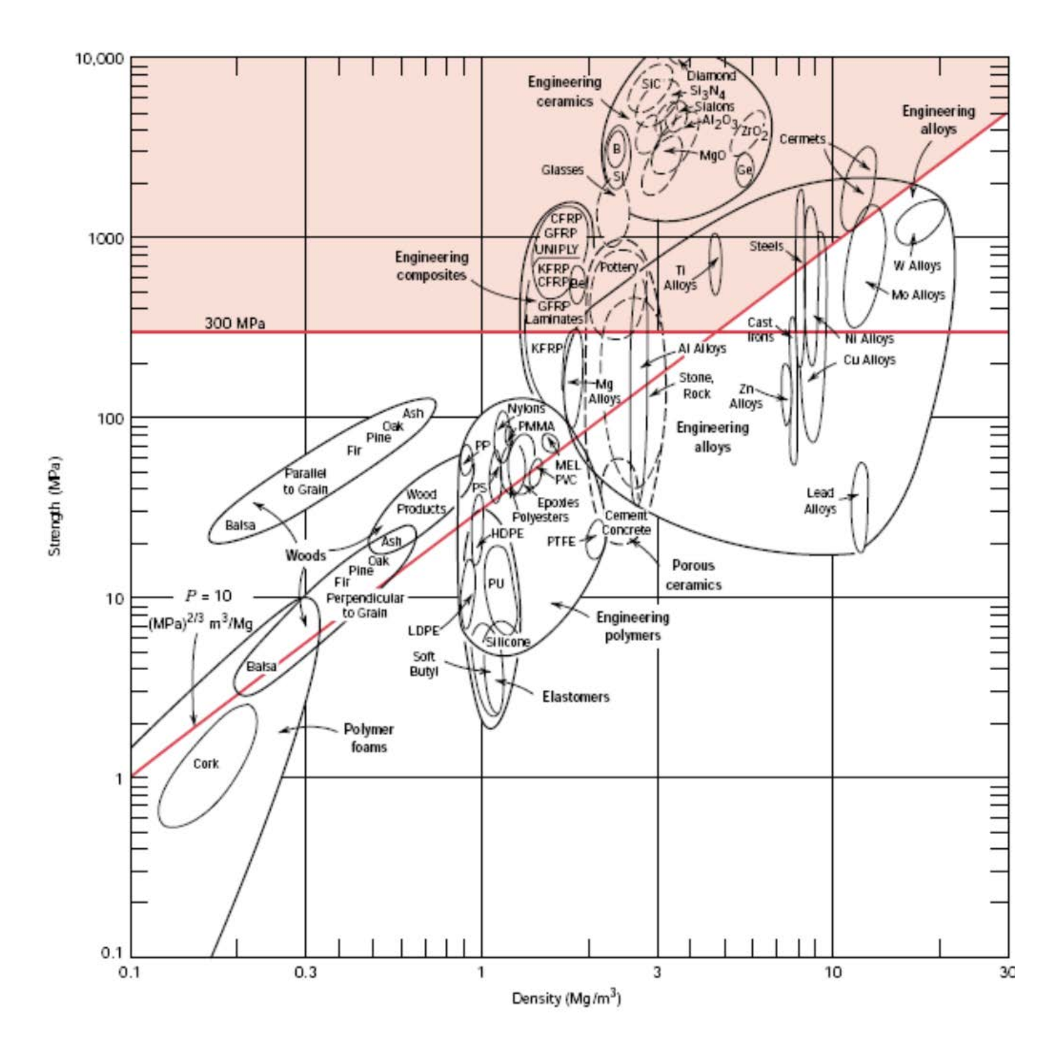
الآن، نأخذ لوغارتم الطرفين للمعادلة [9] ونحصل على:

$$\log(\tau_f) = \frac{3}{2}\log(\rho) + \frac{3}{2}\log(\mathrm{P}) \qquad [10]$$

إن المعادلة أعلاه، تشير الى أن رسم $(\log \mu_f)$ مقابل $(\log \mu)$ يؤدي الى الحصول على مجموعة من الخطوط المستقيمة والمتوازية جميعها لها ميل Slope مقداره (3/2). وكل خط في المجموعة له دليل أداء Performance Index (P) مختلف. إن هذه الخطوط كما ذكرنا، تسمى خطوط دليل التصميم Design Guidelines. وقد تم بيان أربعة من هذه الخطوط في الشكل 35.. وقيم هذه الخطوط تتضمن: (P=3, 10, 30, 100 $(MPa)^{2/3}m^3/Mg$). إن جميع المواد التي تقع على أحد هذه الخطوط تتميز بأداء متساوي على أساس المقاومة لكل كتلة Strength-Per-Mass، أما المواد التي تقع فوق خط معين، فإنها سوف تتميز بدليل أداء أعلى، بينما تلك التي تقع تحت ذلك الخط، فإنها تبدي دليل أداء منخفض. على سبيل المثال، المادة التي لها كثافة مقدارها ($0.3\ Mg/m^3$) وتقع على خط دليل التصميم عند دليل أداء مقداره (P=30) سوف يكون لها مقاوية مساوية لمقاومة تلك المادة التي لها كثافة مقدارها ($1\ Mg/m^3$) وتقع على خط دليل التصميم عند دليل أداء مقداره (P=10).الآن، طريقة الإختيار تتضمن إختيار أحد هذه الخطوط أي إختيار الخط الذي يتضمن مجموعة فرعية معينة من المواد. ولتوضيح ذلك، نختار على سبيل المثال، الخط الذي عنده (P=10 $(MPa)^{2/3}m^3/Mg$) المبين في الشكل 4.5. إن المواد التي تقع على طول هذا الخط أو فوقه تمثل منطقة البحث Search-Region من المخطط. وهي تعتبر مواد مرشحة Candidate Materials للعمود الدّوار Rotating Shaft حيث أنها تتضمن:

- منتجات الخشب Wood Products.
- بعض اللدائن Some Plastics.

- السبائك الهندسية Engineering Alloys.
- المواد المركبة الهندسية Engineering Composites.
- الزجاج Glasses.
- المواد السيراميكية Engineering Ceramics.



الشكل 4.5 مخطط اختيار المواد، المقاومة مقابل الكثافة. حيث يوضح المواد المرشحة للعمود الإسطواني المصمت Solid Cylindrical Shaft في داخل المساحة المظللة Shaded Area التي لها دليل أداء أعلى من $\rho = 10\ (MPa)^{2/3} M^3 / Mg$ ، ومقاومة أعلى من MPa300 .

وعلى أساس إعتبارات، متانة الكسر Fracture Toughness فإن كل من السيراميك الهندسي والزجاج سوف تستبعد من عملية الإختيار. الآن، نفرض

وجود مشكلة أخرى، تتضمن، أن قيمة مقاومة العمود يجب أن تكون أكبر أو تساوي (300 Mpa). وهذه يمكن تحديدها على مخطط إختيار المواد بواسطة رسم خط أفقي عند القيمة (300 Mpa) كما مبين في الشكل 45.. ونلاحظ بعد ذلك، أن منطقة البحث Search Region تكون محصورة مرة أخرى عند المساحة ما بين الخطين (خط دليل الأداء $P=10\ (MPa)^{2/3}m^3/Mg$ وخط المقاومة Mpa300) ونتيجة لذلك، تستبعد المواد التالية:

- جميع منتجات الخشب All Woods.
- جميع البوليمرات الهندسية All Engineering Polymers.
- السبائك الهندسية الأخرى (أي سبائك Mg وبعض سبائك Al).
- بعض المواد المركبة الهندسية Some Engineering Composites.

بينما ترشح المواد التالية:

- سبائك الفولاذ Steel Alloys.
- سبائك التيتانيوم Titanium Alloys.
- سبائك الألمنيوم العالية المقاومة High Strength Aluminium Alloys.
- بعض المواد الهندسية المركبة Engineering Composites.

الجدول 5.5 يبين الكثافة Density، المقاومة Strength، ودليل أداء المقاومة Strength Performance Index للمواد المرشحة.

Material	ρ (Mg/m³)	τ_f (Mpa)	$\tau_f^{2/3}/\rho$=p [(Mpa)$^{2/3}$m³/Mg]
Carbon fibre-reinforced composite (0.65 fibre fraction)[a]	1.5	1140	72.8
Glass fibre-reinforced composite (0.65 fibre fraction)[a]	2	1060	52
Aluminium alloy (2024-T4)	2.8	300	16
Titanium alloy (Ti-6Al-4V)	4.4	525	14.8
4340 Steel (oil-quenched and tempered)	7.8	780	10.9

[a] The fibres in these composite are continuous , aligned, and wound in a helical fashion at a 45° angle relative to the shaft axis

الجدول 5.5 الكثافة (ρ)، المقاومة (τ_f)، دليل الأداء (P) للمواد الهندسية الخمسة المرشحة.

وبالإعتماد على التحليل بإستخدام مخطط إختيار المواد Material Selection Chart تم إختيار المواد التالية:

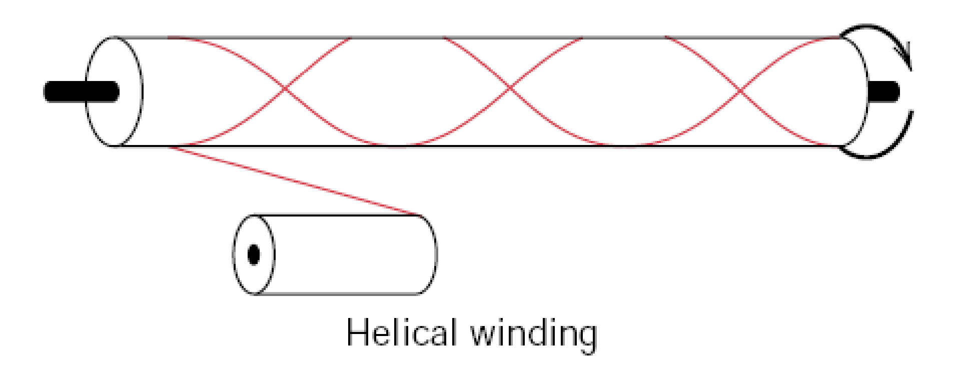
- ثلاث سبائك هندسية Three Engineering Alloys.
- إثنان من المواد الهندسية المركبة Two Engineering Composite.

و من الجدير بالذكر، أن المقاومة في هذا الجدول قد تم تحديدها كالآتي:

- في حالة السبائك الهندسية تم حساب المقاومة بالإعتماد على مقاومة الخضوع كالآتي: (Strength=0.6 Tensile Yield Strength).
- في حالة المواد الهندسية المركبة تم حساب المقاومة بالإعتماد على مقاومة الشد كالآتي: (Strength= 0.6 Tensile Strength).

و يجرى هذا التقريب عادةً عندما يتم التعامل مع المقاومة في حالة الإلتواء Torsion. أضف الى ذلك، أن الألياف الزجاجية والكاربونية Glass and Carbon Fibres، المصطفة Aligned، والمستمرة Continuous، قد أفترض بأنه

تم نسجها بإسلوب لولبي Helical Fashion بالنسبة للمواد الهندسية المركبة المرشحة كما مبين في الشكل 5.5 وعند زواية مقدارها $C45^{o}$ بالنسبة الى محور العمود Shaft-Axis.



شكل 5.5 تقنية اللف اللولبي Helical Winding Technique.

إن المواد الخمسة المرشحة المبينة في الجدول 55. قد تم ترتيبها إعتماداً على دليل أداء المقاومة Strength Performance Index من الأعلى الى الأدنى كالآتي:

المواد المركبة المدعمة بألياف الكاربون	**Carbon Fibre-reinforced composite**
المواد المركبة المدعمة بألياف الزجاج	**Glass Fibre-reinforced composite**
سبيكة الألمنيوم	**Aluminium alloy (2024-T6)**
سبيكة التيتانيوم	**Titanium alloy (Ti-6Al-4V)**
سبيكة الفولاذ (المقسى بالزيت والمراجع)	**4340 Steel (Oil -Quenched and Tempered)**

إن العامل المهم الآخر، الذي يؤخذ بنظر الإعتبار في عملية إختيار المواد هو كلفة المادة Material Cost. إن إعتبارات الكلفة للمواد الخمسة المرشحة مبينة في الجدول 6.5 ، وكمايلي:

- العمود الأول يبين دليل الأداء $\left(\tilde{\mu}\,\mu_f^{\;2/3}\right)$.
- العمود الثاني يدرج القيم التقريبية للكلفة النسبية Relative Cost ويرمز لها بالرمز C ($/$) ، إن هذا العامل يمثل الكلفة لكل وحدة كتلة من المادة Per Unit Mass Cost of Material مقسوماً على الكلفة لكل وحدة كتلة من الفولاذ المنخفض الكاربون Per Unit Mass Cost of Low Carbon Steel (حيث يعتبر أحد المواد الهندسية الشائعة الإستخدام). إن الهدف الأساسي من إستخدام (C) يكمن في أن سعر المادة Material Price المعينة يتغير مع الزمن بصورة سريعة، بينما نسبة السعر Price-Ratio مابين تلك المادة ومادة أخرى سوف يخضع الى التغير مع الزمن بشكل بطيء جداً.
- وأخيراً، العمود المبين في الجانب الأيمن، من الجدول 6.5 يبين ناتج حاصل ضرب دليل الأداء مع الكلفة النسبية. إن هذا الناتج يزودنا بمقارنة للمواد الخمسة المرشحة على أساس كلفة هذه المواد التي يمكن إستخدامها في تصنيع العمود الإسطواني الذي سوف لايخضع الى الكسر بواسطة عزم الإلتواء Twisting Moment (M_t).

Material	$\rho/\tau_f^{2/3}$ [10^{-2}{Mg/(Mpa)$^{2/3}$m^3}]	$\overline{C}$ (S/S)	$\overline{C}(\rho/\tau_f^{2/3})$ [10^{-2}(S/S){Mg/(Mpa)$^{2/3}$m^3}]
4340 Steel (oil-quenched and tempered)	9.2	5	46
Glass fibre-reinforced composite (0.65 fibre fraction)	1.9	40	76
Aluminium alloy (2024-T4)	6.2	15	93
Carbon fibre-reinforced composite (0.65 fibre fraction)	1.4	80	112
Titanium alloy (Ti-6Al-4V)	6.8	110	748

الجدول 6.5 نسبة $(\rho/\tau_f^{2/3})$، الكلفة النسبية $\overline{C}$، وناتج كل من $(\rho/\tau_f^{2/3})$و $\overline{C}$ للمواد الهندسية المرشحة.

حيث تم إستخدام هذا الناتج لأن، دليل الأداء $(\tilde{\mu}\,\mu_f^{2/3})$ يتناسب مع كتلة المادة المطلوبة (المعادلة [8]) و($/$) C هو الكلفة النسبية Relative Cost لكل وحدة كتلة من المادة. وعليه، المواد التي سوف تكون أكثر إقتصادية تتضمن:

- الفولاذ 4340.
- يليه المادة المركبة المدعمة بألياف الزجاج.
- ثم سبيكة الألمنيوم (2024-T6).
- ثم المادة المركبة المدعمة بألياف الكاربون.
- و أخيراً، سبيكة التيتانيوم (Ti-6Al-4V).

إعتبارات الخاصية الأخرى والتصميم النهائي Other Property Consideration and Final Design

حتى الآن، لم نأخذ بنظر الإعتبار، سوى مقاومة المواد Materials Strength، في عملية إختيار المواد. حيث يمكن أن تكون هناك خواص أخرى مهمة نسبة الى أداء العمود الأسطواني، على سبيل المثال، الجساءة Stiffness، وكذلك، سلوك الكلال Fatigue Behaviour عندما يكون العمود دوّاراً، أضف

الى ذلك، تكاليف التصنيع Fabrication Costs يجب أن تؤخذ بنظر الإعتبار حيث تم إهمالها في التحليل أعلاه. وبالنسبة الى الجساءة Stiffness، فإن تحليل أداء الجساءة الى الكتلة Stiffness-to-Mass Performance سوف يكون مشابهاً الى التحليل أعلاه الذي تم إجراءه على المقاومة. وفي هذه الحالة، يمكن التعبير عن دليل أداء الجساءة Stiffness Performance Index (P) من خلال العلاقة التالية:

$$P_s = \frac{\sqrt{G}}{\rho} \qquad [11]$$

حيث أن (G) هو معامل القص Shear Modulus، إن مخطط إختيار المواد المناسب الذي سوف يتم إستخدامه في عملية إختيار المادة سوف يكون العلاقة مابين logG versus log μ ().

وبعد ذلك، يتم جمع بيانات دليل الأداء مع بيانات الكلفة لكل وحدة كتلة بالنسبة للمواد المرشحة في عملية إختيار المواد. ومن خلال هذه البيانات يتم ترتيب المواد المرشحة على أساس دليل الأداء والكلفة. وبعد تحديد المواد المفضلة، يفضل عادة إنشاء جدول يتضمن نتائج المعايير المختلفة التي تم إستخدامها مثل معيار المقاومة، معيار الجساءة...الخ. كما أن هذا الجدول سوف يتضمن جميع المواد المرشحة، دليل الأداء، الكلفة...الخ لكل معيار وبالتالي سوف يتم وضع العلاقات الصحيحة من خلال هذا الجدول مابين نتائج عملية التصميم النهائي.

5 .5 مضرب التنس Tennis Racket

إن وظيفة مضرب التنس هي نقل القدرة من ذراع اللاعب الى كرة التنس Tennis Ball. إن شروط هيكل ومقبض Handle المضرب تتضمن:

- المقاومة العالية.
- الجساءة العالية.
- الوزن الخفيف.
- المتانة.
- القابلية على مقاومة حمل الصدمة.
- القابلية على تحمل الزحف أو الإلتواء نتيجة التعرض الى تغيرات في درجات الحرارة.
- يمكن أن تشكّل الى الشكل المطلوب.
- القابلية على إخماد الإهتزازات، فعندما تضرب الكرة الخيوط (أو شبكة الأسلاك) فإن الصدمة تؤدي الى إهتزاز المضرب. وهذه الإهتزازات سوف تنتقل بدورها الى هيكل المضرب الى ذراع اللاعب وعند عدم خفض سعة الذبذبة لهذه الإهتزازات خلال عملية الإنتقال، فإن مرفق اللاعب Player's Elbow سوف يعاني من بعض الضرر الذي يعرّف بمرفق التنس Tennis Elbow.

إن الكلفة سوف تكون العامل المهم، عندما نأخذ بنظر الإعتبار مضارب التنس للإستخدام العام General Population والتأثير يكون أعلى في حالة لاعبي التنس المحترفين Professional Tennis Players. إن شرط المقاومة العالية والوزن الخفيف يمكن أن يترجم الى شرط القيمة العالية للنسبة (المقاومة/الكثافة) أي المقاومة النوعية العالية. وبنفس الطريقة شرط الجساءة العالية والوزن الخفيف يمكن أن يترجم الى القيمة العالية للمقدار (معامل المرونة/الكثافة) أي المعامل النوعي العالي. إن الإحتمالات الممكنة تتضمن،

الخشب Wood، المعادن Metals، المواد المركبة Composites. الجدول 5.7 يبين القيم النموذجية في بعض المواد الممكنة.

Material	Specific Strength (Mpa/Mg m^{-3})	Specific Stiffness (Gpa/Mg m^{-3})	Relative Toughness	Relative Vibration Damping	Relative Cost
Woods					
Ash	107	20	Good	Good	Low
Hickory	105	21	Good	Good	Low
Aluminium alloys					
Al-Cu alloy, precipitation hardened	15	25	Good	Poor	Medium
Al-Mg alloy annealed	54	25	Good	Poor	Medium
Steels					
Mn steel, quenched and tempered	90	27	Good	Poor	Medium
Ni-Cr-Mo steel, quenched , tempered	115	27	Good	Poor	Medium
Composites					
Epoxy + 60%carbon	890	90	Medium	Medium	High
Epoxy +70%glass	750	25	Medium	Medium	High

الجدول 7.5 المواد المرشحة لمضرب التنس Tennis Racket.

إن الخشب له مزايا، حيث أنه يكون متين Tough، له مقاومة نوعية جيدة، خواص تخميد جيدة للإهتزازات ومنخفض الكلفة. وكذلك، الجساءة النوعية تكون جيدة ولكن الإنحناء أو الإلتواء Warping يمكن أن يكون مشكلة. ويمكن تفادي ذلك، بإستخدام الخشب الرقائقي Laminated Wood أي عدة قطع من الخشب مع أليافها مربوطة بإتجاهات مختلفة معاً يعطي شكل الرقائق، وهذه تدمج مع قطع من الخشب بحيث يمكن الحصول على شكل المضرب.

إن سبائك الألمنيوم أيضاً تتميز بالمتانة والجساءة النوعية الجيدة، إلا أنها أعلى كلفة من الخشب. والمشكلة الأخرى، هي قابلية الإخماد الضعيفة جداً للإهتزازات. إن الألمنيوم يمكن حمايته من هجوم التآكل بواسطة الأوساط الرطبة بإستخدام عملية الأنودة Anodising. إن مضرب الألمنيوم Aluminium

Racket يمكن صناعته بواسطة ثني (أو حني) المقاطع المبثوقة المجوفة Extruded Hollow Sections الى الشكل المطلوب.

اما سبائك الفولاذ، فإنها تتميز أيضاً بمقاومة نوعية عالية وكذلك، جساءة نوعية عالية. والفولاذ عند هذه القيم من المقاومة له كلفة مقاربة من كلفة سبائك الألمنيوم. والمشاكل تتضمن، قابليةالإخماد المنخفضة جداً للإهتزازات، ومقاومة التآكل الضعيفة في الوسط الرطب. إن مضرب الفولاذ Steel Racket يمكن تصنيعه أيضاً بواسطة ثني المقاطع المبثوقة المجوفة الى الشكل المطلوب.

المواد المركبة، يمكن إستخدامها أيضاً، بهذا الخصوص، حيث تتميز بمقاومة نوعية عالية جداً وكذلك جساءة نوعية عالية جداً ومتانة مقبولة وكذلك قابلية معتدلة لإخماد الإهتزازات. إن المشكلة الرئيسية تكمن في الكلفة العالية لهذه المواد. إن مضرب المادة المركبة يمكن تصنيعه بواسطة حقن مصهور البوليمر الحاوي على ألياف الكاربون في القالب الذي يأخذ شكل المضرب Racket-Shaped Mould وهذا يؤدي بدوره الى الحصول على مضرب من مادة مركبة صلبة بالنسبة للهيكل والمقبض. ويخضع هذا بعد ذلك الى عملية تحسين الخواص وهو لايزال في القالب. ويخضع الغشاء الخارجي فقط من المادة المركبة الى التجمد، وذلك لصب القلب السائل بحيث عندما يتجمد المضرب نحصل على شكل أنبوب مجوّف ويمكن بعد ذلك، ملأ فجوة الأنبوب برغوة البولي يورثين Polyurethane Foam. حيث أن هذا يحسّن من قابلية إخماد الإهتزازات للمضرب.

و عند مقارنة المواد أعلاه، نلاحظ أن مضرب المادة المركبة يعطي أفض الخواص ولكن كلفته أعلى مقارنة مع المواد الأخرى (الخشب، الألمنيوم، الفولاذ) وهذا يتم إستخدامه في أغلب الأحيان من قبل لاعبي التنس المحترفين. وإعتماداً على الكلفة المنخفضة والخواص يأتي الخشب بعد المادة المركبة يليه

الألمنيوم ومن ثم الفولاذ.

6.5 قنينة المشروب الغازي Fizzy Drink Bottle

ندرس الخواص المطلوبة للقنينة المستخدمة كحاوية للمشروب الغازي Fizzy Drink :

- مقاومة صدمة عالية، متينة، لا تكون هشة.
- خواص منع تسرّب عالية أي أن المشروب يجب أن لا ينضح أو يتسرّب من خلال جدار الحاوية أو يفقد أزيزه أو فورانه Fizz نتيجة فقدان ضغط ثاني أوكسيد الكاربون.
- يجب إستخدام مادة لاتؤدي الى تلوث أو فساد Taint المشروب.
- جسوءة نسبياً بحيث تحتفظ الحاوية بشكلها.
- قابلية على مقاومة ضغط ثاني أوكسيد الكاربون من دون حدوث التشوّه.
- قابلية على القولبة بالنفخ.
- شفّافة وصافية.
- منخفضة الكلفة لأنه لاتوجد هناك غاية لإعادة إستخدامه (بخلاف قناني الحليب Milk Bottle حيث هناك غاية لإعادة إستخدامها عدد من المرات).
- خفيفة الوزن.

إن شرط القولبة بالحقن يعني أن المادة يجب أن تكون لدنة حرارياً Thermoplastic. وبالنسبة الى خواص الصدمة يمكن تقسيم البوليمرات الى ثلاثة أصناف:

أ. الصنف الأول First Category : المواد البوليمرية التي تكون هشة Brittle حتى عندما تكون غير محززة Unnotched.

ب. الصنف الثاني Second Category : المواد البوليمرية التي تكون متينة Tough عندما تكون غير محززة، ولكنها هشة عندما تكون محززة Notched.

ج. الصنف الثالث Third : المواد البوليمرية التي تكون متينة تحت جميع الظروف.

الجدول 8.5 يبين المواد في كل صنف. وبالنسبة الى خواص الصدمة، يكون إختيار المادة محصوراً مابين الأصناف 32 , . وعليه، فإن الأكريلك Acrylic، على الرغم من كونه شفّاف وصافي فإنه يعتبر مادة غير مناسبة. ولهذا يقع الإختيار على المواد الموجودة في الأصناف 32 , حيث تكون شفافة وصافية، وهي تتضمن:

- Low Density Polyethylene (LDP).
- PVC.
- Polyethylene Terephthalate.

1.Brittle	2.Tough but brittle when notched	3.Tough
Acrylic	Polypropylene	Wet nylon
Glass-filled nylon	Cellulosis	Low-density Polyethylene (LDP)
Polystyrene	PVC	ABS (some forms)
	Dry nylon	Polycarbonate (some forms)
	Acetals	PTFE
	High-density polystyrene	
	ABS (some forms)	
	Polyethylene terephthalate	
	Polycarbonate (some forms)	

الجدول 8.5 خواص الصدمة للمواد البوليمرية.

إن القناني التي تحوي على المشروبات الغازية أو المشروبات التي تصدر أزيزاً Fizzy Drinks تعني القناني الحاوية على سوائل تحوي على ثاني أوكسيد

الكاربون تحت الضغط Carbon Dioxide Under Pressure. الجدول **9.5** يوضح البيانات التي تبين إنفاذية الماء وثاني أوكسيد الكاربون في المواد الثلاثة المرشحة.

Polymer	Permeability 10^{-8} mol mN^{-1} s^{-1}	
	To Water	To carbon dioxide
Low-density polyethylene	30	5700
PVC	40	98
Polyethylene terephthalate	60	30

الجدول 9.5 إنفاذية الماء وثاني أوكسيد الكاربون في البوليمرات.

وعلى الرغم من أن المادة المتينة أي البولي أثيلين المنخفض الكثافة سوف لا تكون مادة مناسبة لحاوية المشروب الغازي بسبب إنفاذيته العالية لثاني أوكسيد الكاربون وبالتالي المشروب سوف لايحتفظ بأزيزه. ومادة Polyethylene Terephthalate فإنها تبدو الإختيار المفضل. وهذه المادة تستخدم بشكل واسع في حاويات المشروب المكربن (مشبّع بثاني أوكسيد الكاربون) Carbonated Drink Containers. أما مادة PVC فإنها تستخدم في حالة المشروبات الغير مكربنة Non-Carbonated Drinks مثل الخمر Wine.

7.5 ريش التوربين الغازي Gas Turbine Blades

تستخدم محركات التوربين الغازي في دفع وتسيير المركبات مثل السفن البحرية Warships، والطائرات Aircrafts، المولدات الكهربائية Electric Generators، محطات ضخ النفط أو الغاز عبر خطوط الأنابيب. إن المحرك Engine يتكون من ثلاث أجزاء رئيسية:

1. الضاغط Compressor.

2. صندوق الإحتراق Combustion Chamber.

3. التوربين Turbine.

إن الهواء يسحب الى الضاغط بواسطة ريش المروحة Fan Blades ومن ثم يضغط وبالتالي ترتفع درجة حرارته. وفي صندوق الضغط Compression Chamber يمزج الهواء مع الوقود الذي يحترق ويزيد كل من درجة الحرارة وضغط الهواء. إن الغازات الساخنة والمضغوطة تمر بعد ذلك في مقطع التوربين حيث تصطدم مع ريش التوربين بسرعة عالية وتؤدي نتيجةً لذلك الى تدويرها.

إن ريش التوربين يجب أن تدور عند سرع عالية، بحدود (10000 rev/min)، في وسط مكون من نواتج الإحتراق عند درجة حرارة تصل الى ^{o}C1200. كما أن الغازات الساخنة تضرب الريش بسرعات عالية تصل الى حوالي m/s700 . وهناك أيضاً حطام أو فتات Debris في الغازات نتيجة المكونات التي تسحب مع تيار الهواء. وعليه، سوف تخضع الريش الى تغيرات كبيرة وسريعة في درجة الحرارة عند تشغيل أو إطفاء المحرك. وكذلك الأجزاء المختلفة من الريشة يمكن أن تكون عند درجات حرارية مختلفة. ونتيجة لسرع الدوران العالية، فإن كتلة الريش تؤدي الى تكون قوى جذب مركزية Centripetal Forces كبيرة فعّالة على الريش وإجهادات تتراوح في المدى (100-150 MPa).

إن الخواص المطلوبة، لمادة ريش التوربين الغازي هي:

- مقاومة الزحف العالية High Creep Strength : وهذا يعني مقاومة تمزق عالية عند درجة حرارة العملية. ونتيجة لأهمية كتلة الريشة، فإن

المطلوب هو مقاومة تمزق عالية لكل وحدة كتلة أي مقاومة تمزق نوعية عالية High Specific Rupture Strength.

- مقاومة كلال حراري عالية High Thermal Fatigue Resistance : إن تغيرات في درجات الحرارة والإهتزازات الميكانيكية يمكن أن تؤدي الى إجهادات دورية التي تؤدي بدورها الى الفشل نتيجة الكلال.
- مقاومة التآكل العالية High Corrosion Resistance : إن الوسط الذي يتضمن الهواء ونواتج الإحتراق عند درجة الحرارة العالية يمكن أن يؤدي الى حدوث مشكلة التآكل أي الأكسدة Oxidation.
- الكتلة المنخفضة Mass Low : إن كتلة الريش يجب أن تكون منخفضة قدر الإمكان، لأن قوى الجذب المركزي الناشئة عن كتلة الريشة التي تدور عند سرع عالية تؤدي الى تكوّن الإجهادات في الريشة. أضف الى ذلك، أن التوربين الغازي المستخدم في الطائرة يكون الهدف عادة هو أخف وزن ممكن للمواد.
- المقاومة العالية High Strength: إن ريش التوربين يجب أن تتميز بمقاومة عالية عند درجات حرارة العملية. وبالنظر لأهمية الكتلة، فإن الهدف هو مقاومة عالية لكل وحدة كتلة أي مقاومة نوعية عالية.
- مادة متينة Tough Material : إن الريشة التي تخضع الى الصدمة بواسطة السرع العالية للغازات والحطام (أو الفتات). أضف الى ذلك، أن الريشة تخضع الى معاملات تمدد وإنكماش مختلفة في الأجزاء المختلفة منها.

- الكلفة Cost : كلفة المادة ربما لاتكون مهمة كأهمية كلفة العملية أو المعالجة Processing.

بينما تتميز المواد السيراميكية بخواص درجات الحرارة العالية، إلا أنها تعاني من الهشاشية Brittleness وبالتالي تستبعد من عملية الإختيار كمواد ريش توربينية. إن الشرط الذي تتميز به المادة بأن يكون لها مقاومة جيدة ومقاومة زحف عند درجات الحرارة العالية يؤدي الى إستبعاد العديد من المواد المعدنية، حيث يكون الإختيار مقتصراً على السبائك ذات أساس نيكل- كروم Nickel-Chromium Base Alloys. الجدول 105. يبين خواص هذه السبائك.

Alloy	Rupture Strength (Mpa) 1000 h at 1000^{o}C	Density (Mg/m^3)
Nimonic 80A	30	8.22
Nimonic 90	40	8.18
Nimonic 115	100	7.85
MAR-M246	190	8.44
Udimet 700	119	7.91

الجدول 10.5 خواص السبائك ذات أساس Ni –Cr.

و على أساس مقاومة التمزق Rupture Strength نلاحظ من الجدول أن، السبائك MAR-M246 وUdimet700 تبدو الإختيارات المفضلة. إن السبيكة MAR-M246 هي عبارة عن سبيكة مسبوكة (مصبوبة) Cast Alloy بينما السبيكة Udimet700 هي عبارة عن سبيكة مطروقة (مشكلة) Wrought Alloy. وبالنظر لشكل الريشة المعقدة، فإن عملية السباكة ربما تكون الطريقة الأكثر فعالية من حيث الكلفة Cost-Effective.

الآن، ندرس تطبيق طريقة تقدير الإستحقاق Merit Rating لتحديد المادة للريشة التوربينية. بالنسبة لشرط المقاومة النوعية العالية Specific Strength

يمكننا إنشاء جدول الإستحقاق Merit Table كما مبين في الجدول 11.5. إن السبيكة Nimonic 115 لها أعلى مقاومة نوعية وبالتالي تعطى أعلى تقدير أي (100). أما بقية السبائك فإنها تعطى تقديرات نسبة الى مقاومتها النوعية. وعليه السبيكة Nimonic 80 تعطى التقدير [46=48.7/105.4)x100)].

Alloy	Tensile Strength (Mpa)	Density (Mg/m^3)	Specific Strength ($Mpa/Mg\ m^{-3}$)	Merit Rating
Nimonic 80A	400	8.22	48.7	46
Nimonic 90	428	8.18	52.3	50
Nimonic 115	828	7.85	105.4	100
MAR-M246	862	8.44	102.1	97
Udimet 700	690	7.91	87.2	83

الجدول 11.5 تقدير الاستحقاق Merit-Rating للمقاومة النوعية.

وبإمكاننا تحديد تقديرات الإستحقاق لكل خاصية مناسبة بإستخدام نفس الإسلوب السابق. ولغرض تحديد إجمالي إستحقاق التقدير Overall Rating Merit لكل مادة، تعطى كل خاصية عامل وزن معين (عامل التعديل الترجيحي) Weighting Factor طبقاً لأهمية الخاصية لذلك الجزء. وبما أن خاصية مقاومة التمزق النوعية Specific Strength تعتبر أهم خاصية ومقاومة الأكسدة Oxidation Resistance أقل خاصية أهمية مقارنةً مع الخواص الأخرى، فإن عوامل التعديل الترجيحي تكون كالآتي:

Specific ruptur strength	**6**
Thermal fatigue resistance	**5**
Specific strength	**4**
Oxidation resistance	**3**

إن إجمالي التقدير Overall Rating للمادة يمكن الحصول عليه بعد ذلك، بواسطة حاصل ضرب تقدير تقدير الإستحقاق Merit Rating النسبي لكل

خاصية مع التعديل الترجيحي Weighting Factor لتلك الخاصية ومن ثم الحصول على مجموع النتائج. الجدول 12.5 يبين نتائج هذه العملية. وعلى هذا الأساس تبدو السبيكة Udimet 700 المادة التي تتميز بأفضل مزيج من الخواص.

Alloy	Specific Rupture		Fatigue Resistance		Specific Strength		Oxidation Resist.		Overall Rating
	M	WM	M	WM	M	WM	M	WM	
Nimonic 80A	16	96	40	200	46	184	100	300	780
Nimonic 90	21	126	20	100	50	200	100	300	726
Nimonic 115	53	318	94	470	100	400	75	225	1413
MAR-M246	100	600	27	115	97	388	35	105	1208
Udimet 700	63	378	100	500	83	332	75	225	1435

Note: M=Merit Rating , WM is the product of the weighting factor and the merit rating .

الجدول 12.5 تقديرات الاستحقاق وعوامل الوزن.

إن إحدى الأساليب المستخدمة عند أخذ كلفة المادة ومعالجتها بنظر الإعتبار هو الحصول على الكلفة النسبية Relative Cost لكل مادة ومن ثم تقسيم قيمة التقدير الإجمالي Overall Rating Value على عامل الكلفة النسبية Relative Cost Factor (C). ويمكن التعبير عن ذلك من خلال العلاقة التالية:

$$Cost\ Modified\ Rating = \frac{\sum\left(W_1 M_1 + W_2 M_2 ...\right)}{C} \qquad [12]$$

حيث أن:

W_1 = عامل التعديل الترجيحي Weighting Factor للخاصية (1) حيث أن تقدير الإستحقاق هو (M_1).

W_2 = عامل التعديل الترجيحي Weighting Factor للخاصية (2)حيث أن تقدير الإستحقاق هو (M_2).

...الخ.

الجدول 13.5 يبين النتائج بإستخدام العلاقة أعلاه. وعلى هذا الأساس، الإختيار الأمثل هو Udimet 700. إن النقطة المهمة التي يجب التنبه إليها

عندإستخدام هذه الطريقة هو تحديد عوامل التعديل الترجيحي Weighting Factors للخواص المختلفة. وعليه، إذا فرضنا أن مقاومة الأكسدة تعطى أعلى قيمة معامل تعديل ترجيحي أي أعلى وزن فإن السبيكة Nimonic 80A أو السبيكة Nimonic 90 ربما تكون الإختيار الأفضل.

الجدول 5.13 تقدير الكلفة المعدّلة Cost-Adjusted .

Alloy	Relative Cost	Cost-Adjusted Weighting
Nimonic 80A	64	12
Nimonic 90	86	8
Nimonic 115	100	14
MAR-M246	64	19
Udimet 700	99	23

الجدول 13.5 تقدير الكلفة المعدّلة Cost- Aduusted.

8.5 إختيار مادة العدة Tool Material Selection

عندما نريد إختيار مادة عدة Tool Material من مجموعة المواد التي يمكن إستخدامها في تصنيع عدة معينة، يجب أن نأخذ بنظر الإعتبار شروط خاصية تلك العدة، على سبيل المثال، هل سوف تعمل العدة عند درجة حرارة الغرفة، أم عند درجات حرارية عالية؟ هل سوف تكون هناك أحمال صدمة Shock Loads؟ هل سوف يؤخذ البلى الإحتكاكي Abrasive Wear بنظر الإعتبار؟ ما هو مستوى الصلادة المطلوب؟ هل أن عمر العدة المطلوبة سوف يكون طويلاً؟

الآن، ندرس الشروط المطلوبة في تصنيع عدة قطع Cutting Tool تستخدم في حالة السرع العالية High Speed. وبالنظر لوجود شرط السرع العالية، فإن مادة العدة يجب أن تتميز بمقاومة عالية للطراوة (الليونة) الحرارية Thermal Softening. أضف الى ذلك، أن عملية القطع تحتاج الى صلادة عالية High Hardness وقيمة معتدلة من المتانة Toughness. الجدول 14.5 a ، يبين

مقارنة الخواص في بعض مواد عدد القطع. وبإستخدام هذه البيانات، فإن تحليل الإستحقاق Merit Analysis يعطي النتائج المبينة في الجدول 14.5 b.

Material	Working Hardness* HRC	Resistance to Thermal Softening	Resistance to Abrasive Wear	Relative Toghness	Relative Cost
BW1	68	Low	Fair	High	1
BS1	45	Medium	Fair	Very good	3
BO1	60	Low	Medium	Medium	3
BA2	62	High	Good	Medium	4
BD2	62	High	Very good	Low	5
BH13	50	High	Fair	Very good	4
BT1	52	Very high	Very good	Low	8
BM2	60	Very high	Very good	Low	7
Stellite 4	50	Very high	Very good	Low	10
Carbides	70	Very high	Very good	Low	10
Alumina	80	Very high	Very good	Low	12

Note: The hardness of the steel is of the material after tempering at the recommended temperature.

الجدول a14.5 خواص مواد العدة Tool Materials.

Material	Relative Cost	Hardness		Thermal Softness		Abrasive Wear		Toughness		Rating	Rating/ Cost
		M	WM	M	WM	M	WM	M	WM		
BW1	1	85	425	20	160	30	60	70	210	855	
BS1	3	56	280	50	400	30	60	100	300	1040	
BO1	3	75	375	20	160	50	100	50	150	785	
BA2	4	78	390	70	560	70	140	50	150	1240	
BD2	5	78	390	70	560	100	200	20	60	1210	
BH13	4	63	315	70	560	30	60	100	300	1235	
BT1	8	65	325	100	800	100	200	20	60	1385	173
BM2	7	75	375	100	800	100	200	20	60	1435	205
Stellite 4	10	63	315	100	800	100	200	20	60	1375	138
Carbides	10	88	440	100	800	100	200	20	60	1500	150
Alumina	12	100	500	100	800	100	200	20	60	1560	130

الجدولb 14.5 تحليل تقدير الاستحقاق لعدة القطع ذات السرعة العالية.

إن عوامل التعديل الترجيحي Weighting Factors المستخدمة هي:

Hardness	**5**
Thermal softening	**8**
Abrasive wear	**2**
Toughness	**3**

إن التقدير الإجمالي يشير الى أن عدة فولاذ السرع العالية High Speed Steel مثل BT1 أو BM2، الكاربيدات Carbides أو الألومينا Alumina هي الإحتمالات الممكنة. وعندما نأخذ الكلفة بنظر الإعتبار لهذه الخيارات المحتملة، فإن عدة فولاذ السرعة العالية BM2 هي الخيار المفضل. ولكن، الصلادة العالية لكل من الكاربيدات والألومينا ربما تؤدي الى عمر أطول للعدة Longer Tool Life.

الآن، ندرس الشروط اللازمة في حالة قالب مكبس التخريم Punch-Press Die، إن الشروط الرئيسية، تتضمن المقاومة الجيدة للبلى الإحتكاكي Abrasive Wear، أدنى كمية من التشوه عند التصليد Hardening Distortion. فإذا فرضنا أن عامل التعديل الترجيحي للخواص المطلوبة هو:

Abrasive wear	**8**
Hardening Distortion	**5**
Hardness	**4**
Toughness	**3**

الجدول 5.15 تحليل تقدير الإستحقاق لقالب مكبس الضغط .

Material	Relative Cost	Hardness		Hardening Distortion		Abrasive Wear		Toughness		Rating	Rating/ Cost
		M	WM	M	WM	M	WM	M	WM		
BW1	1	85	340	10	50	30	240	70	210	840	
BS1	3	56	224	50	250	30	240	100	300	1014	
BO1	3	75	300	80	400	50	400	50	150	1250	
BA2	4	78	312	100	500	70	560	50	150	1522	
BD2	5	78	312	100	500	100	800	20	60	1672	334
BH13	4	63	252	90	450	30	240	100	300	1242	
BT1	8	65	260	80	400	100	800	20	60	1520	
BM2	7	75	300	80	400	100	800	20	60	1560	
Stellite 4	10	63	252	100	500	100	800	20	60	1612	161
Carbides	10	88	352	100	500	100	800	20	60	1712	171
Alumina	12	100	400	100	500	100	800	20	60	1760	147

الجدول 15.5 تحليل تقدير الاستحقاق لعدة القطع ذات السرعة العالية.

فبإمكاننا إجراء تحليل الإستحقاق Merit Analysis كما مبين في الجدول 15.5. ومن مجموعة سبائك الفولاذ، تبدو السبيكة BD2 هي الإختيار الأمثل.

إن هذه المادة لها مزايا التقسية في الهواء Air-Quenched وعليه يخفض التشوه الى أدنى كمية ممكنة. إن المواد الأخرى التي تتضمن، Stellite، Carbides، Alumina، أيضاً تعتبر خيارات مفضلة إلا أن عامل الكلفة العالية يؤدي الى إستبعادها.

9.5مواد المحامل Bearing Materials

إنظر المقطع 12.8، الذي يناقش مواد المحامل وخواصها. إن الشروط الرئيسية المطلوبة في مواد المحامل تتضمن:

- مقاومة البلى Wear Resistance : إن معدل البلى يمكن أن يكون عامل مهم في تحديد عمر المحمل Bearing Life.

- المقاومة والجساءة Strength and Stiffness : حيث أن المادة يجب أن تتميز بحد مرونة عالي High Elastic Limit ومقاومة ضد الحمل مع معامل مرونة كافي لمقاومة التشوّه.
- مقاومة صدمة جيدة Good Shock Resistance : يجب أن تتميز المادة بمتانة لمقاومة الصدمات.
- مقاومة كلال جيدة Good Fatigue Resistance : تتطلب مادة المحامل عادة مقاومة كلال تحت الحمل الديناميكي Dynamic Loading.
- قابلية تثبيت Embedability : حيث أن مادة المحمل Bearing Material يجب أن تمتص الأوساخ والأتربة وذلك لخفض الضرر الإحتكاكي Abrasive Damage لسطح التعشيق Mating Surface الى أدنى كمية ممكنة. وهذا يعني المادة الطرية Soft Material مفضلة على المادة الصلدة Hard Material.
- موصلية حرارية عالية High Thermal Conductivity : إن قابلية المادة على تشتيت الحرارة الناتجة من عملية الإحتكاك يعتبر عامل مهم في تجنّب الإرتفاع في درجة الحرارة الى المستوى الذي قد يؤدي الى صهر مادة المحمل وخفض عملية التزييت وبالتالي حدوث عملية اللصب Seizing-Up أي إلتصاق السطحين المتحركين لنقص التزييت.
- مقاومة التآكل الجيدة Good Corrosion Resistance : إن تآكل مادة المحمل يمكن أن يحدث لعدة أسباب على سبيل المثال، وجود الزيوت الحامضية Acidic Oils، التي تؤدي الى تلف أو تحلل سطح المحمل.

الآن، ندرس الشروط المطلوبة في حالة مادة محمل الحمل الخفيف Light-Load Bearing Material حيث يكون الحمل مستقراً، والسرعة عالية. إن السرعة العالية، تعني أن درجات الحرارة العالية يمكن أن تتولد، وبالتالي الموصلية الحرارية العالية تكون مرغوبة. الجدول 2. 11يوضح خواص مواد المحامل. إن الموصلية الحرارية العالية تعني إستبعاد المواد البوليمرية Polymeric Materials والمعادن البيضاء ذات أساس رصاص Lead-Base White Metal. إن الحمل الخفيف يعني أن المقاومة العالية تكون غير ضرورية. وهذا يعني لانأخذ السبائك ذات أساس نحاس Copper-Base Alloys العالية الكلفة بنظر الإعتبار، لأن، المقاومة العالية غير ضرورية. ونظراً لكون الحمل مستقراً Steady Load فهذا يعني أن مقاومة الكلال لاتمثل العامل المهيمن أو الغالب، وعليه، سوف يتراوح الإختيار مابين السبائك ذات اساس ألمنيوم Aluminium-Base Alloys والمعادن البيضاء ذات أساس قصدير Tin-Base Alloys.

إن السبائك ذات أساس ألمنيوم تتميز بمعامل المرونة العالي والكلفة المنخفضة، وعليه، ربما تكون المادة المثلى Optimum Material. الجدول 165. يبين تجليل الإستحقاق Merit Rating بإستخدام عامل التعديل الترجيحي التالي:

Thermal conductivity	**5**
Wear resistance and elstic modulus	**4**
Hardness	**3**
Yield stress and corrosion resistance	**2**
Strength and Fatigue resistance	**1**

الجدول 5.16 تحليل تقدير الإستحقاق للمحمل العالي السرعة، الخفيف الحمل .

Material	Relative Cost	Thermal Conductivity		Wear Resistance		Elastic Modulus		Yield Stress	
		M	WM	M	WM	M	WM	M	WM
Tin-base whitemetal	7	30	150	50	200	50	200	25	50
Lead-base whitemetal	1	14	70	60	240	30	120	20	40
Copper-lead	1.5	25	125	100	400	70	280	20	40
Phosphor bronze	2	25	125	90	400	100	400	100	200
Leaded tin bronze	2	25	125	60	240	100	400	45	90
Aluminium base	1.5	100	500	40	160	70	280	30	60
Polymers	0.3	0.003	0	100	400	5	20	10	20

Material	Hardness		Strength		Corrosion Strength		Fatigue Strength		Rating/ Cost
	M	WM	M	WM	M	WM	M	WM	
Tin-base whitemetal	20	60	30	30	100	200	20	20	130
Lead-base whitemetal	15	45	25	25	80	160	15	15	715
Copper-lead	30	90	25	25	60	120	45	45	750
Phosphor bronze	100	300	100	100	100	200	70	70	898
Leaded tin bronze	60	180	70	70	40	80	55	55	620
Aluminium base	70	210	55	55	60	120	100	100	990
Polymers	10	30	20	20	100	100	15	15	2017

الجدول 16.5 تحليل تقدير الاستحقاق للمحمل العالي السرعة، الخفيف الحمل.

إن الجدول يشير الى أن البوليمرات Polymers، هي المادة المثلى، وهذا يحدث لأن كلفة البوليمرات منخفضة جداً، وعندما تهمل البوليمرات بسبب موصليتها الحرارية المنخفضة، فإن المادة المثلى هي السبيكة ذات أساس ألمنيوم Aluminium –Base Alloy.

5. 10 هيكل السيارة Car Bodywork

إن الخواص المطلوبة في المواد المستخدمة في هيكل السيارة تتضمن:

- يمكن تشكيلها الى الأشكال المطلوبة.
- سطوح ناعمة وذات بريق ولمعان.

- التآكل ليس مهماً بدرجة كبيرة.
- تكون غير هشة، ومتينة بمافيه الكفاية مقابل الضربات أو الصدمات الصغيرة Small Knocks وجسوءة نسبياً.
- منخفضة الكلفة، آخذين بنظر الإعتبار كلفة المواد الأولية Raw Materials، كلفة المعالجة Processing، وكلفة الإنهاء Finishing.

إذا أخذنا بنظر الإعتبار المعادن، فإن عملية المعالجة أو طريقة التصنيع سوف تكون العامل الأساسي في تحديد المادة المستخدمة. إن التشكيل من اللوح تعتبر الطريقة الشائعة. والتشكيل على الساخن Hot Forming يؤدي عادة الى الحصول على إنهاء سطحي غير مقبول وبالتالي يجب إختيار مادة يمكن تشكيلها على البارد Cold Forming. وهذا يعني مطيلية عالية. إن الإحتمالات الممكنة تتضمن سبائك الفولاذ المنخفض الكاربون Low Carbon Steel أو سبائك الألمنيوم Aluminium Alloys. الجدول 17.5 يبين الإستطالة المئوية Percentage Elongation في بعض المواد الممكنة في الحالة الملدّنة Annealed State.

Material	Percentage Elongation
0.1%Carbon steel	42
0.2%Carbon steel	37
0.3%Carbon seel	32
1.25%Mn, aluminium alloy	30
2.24%Mn, aluminium alloy	22

الجدول 17.5 مطيلية سبائك الفولاذ الكاربوني و سبائك الألمنيوم.

ومن خلال بيانات الجدول، نلاحظ أن كل من سبائك الفولاذ الكاربوني وسبائك الألمنيوم يمكن إستخدامها، لأن كلاهما يتميز بمطيلية كافية لتشكيل اللوح. أضف الى ذلك، ان كلاهما يتميز بمتانة مقبولة، ولكن سبائك الألمنيوم

تتميز بالكثافة المنخفضة وبالتالي تؤدي الى الحصول على وزن خفيف للسيارة. ومن ناحية أخرى، تتميز سبائك الفولاذ الكاربوني بقابلية على الإصلاد بالتشكيل Work Hardening بشكل أسرع من سبائك الألمنيوم. إن المادة التي تتميز بسرعة الإصلاد بالتشكيل العالية تكون إحتمالية تكون التخصّر Neck فيها منخفضة. وفي حالة تشكيل اللوح على البارد يبدو هذا التخصّر بشكل منطقة رقيقة Thin Region حيث يكون غير مرغوباً. إن الميزة المهمة التي تميز بها سبائك الفولاذ الكاربوني هي الكلفة المنخفضة ، وعليه، المادة المثلى هي الفولاذ المنخفض الكاربون وعملياً يستخدم الفولاذ الحاوي على أقل من (1%).

إن المواد البوليمرية، يمكن إستخدامها في هياكل السيارات، إلا أن المشكلة الرئيسية التي نواجهها في هذه المواد تكمن في كيفية الحصول على جساءة Stiffness كافية. وأحد الأساليب المستخدمة في تلافي هذه المشكة تتضمن، الحصول على مادة مركبة مكونة من حصيرة الليف الزجاجي Glass Fibre Mat أو القماش Cloth في أرضية المادة اللدائنية الصلدة حرارياً Thermoset. ولسوء الحظ، تكون الطريقة المستخدمة في بناء الهيكل يدوية بدلاً من إستخدام الماكنة ولهذا تكون العملية بطيئة. وبيمنا يمكن إستخدامها عندما يكون المطلوب الحصول على منتج واحد فقط من الهياكل One-Off Bodies، فإنها غير مناسبة في حالة الإنتاج الجملي (الإنتاج بالجملة) Mass Production.

والإسلوب الآخر، هو الحصول على الألواح المقواة بألياف الزجاج Glass-Reinforced Panels بواسطة الضغط على الساخن Hot Pressing من الصفيحة المشكلة ومن ثم مطابقة Fitting اللوح مع الهيكل الفولاذي Steel Frame. ويمكن أن تكون هذه الطريقة مناسبة للإنتاج الجملي. وتستخدم هذه الطريقة عادة في الحصول على مقصورات الشاحنة Lorry Cabs. والطريقة الأخرى، تتضمن الحصول على منتج بشكل طبقة بينية Sandwich-Type من

مادة مركبة من الألواح. وهذه يمكن أن تكون رغوة لدائنية Plastic Foam مابين ألواح لدائنية أو ألواح معدنية , وبينما تؤدي هذه المواد المركبة الى الحصول على الجساءة المناسبة إلا أن كلفتها أعلى من الفولاذ.

الجدول 18.5يبين المقارنة مابين عدد من المواد على أساس الكلفة لكل وحدة خاصية Cost Per Unit Property. فإذا أخذنا، الكلفة لكل وحدة جساءة Cost Per Unit Stiffness كعامل رئيسي، فإن الفولاذ المنخفض الكاربون يعتبر الإختيار الأمثل. أما إذا أخذنا، الكلفة لكل وحدة مقاومة Cost Per Unit Strength كعامل رئيسي، فإن إختيار الفولاذ المنخفض الكاربون Low Carbon Steel لايزال هو الإختيار الأمثل.

Material	Relative Cost/ m3 for Sheet	Tensile Modulus (Gpa)	Tensile Strength (Mpa)	Cost Per Unit Stiffness	Cost Per Unit Strength
Low-carbon steel	1	220	1000	0.005	0.001
Aluminium alloy(Mn)	2.2	70	200	0.03	0.01
Polypropylene	0.2	1.0-2.0	30-40	0.1-0.2	0.005-0.007
ABS	0.8	1.0-3.0	17-58	0.3-0.8	0.01-0.05
Polyester	2	2.0-4.0	20-70	0.5-1.0	0.03-0.1
Polyester-glass cloth	3	20	300	0.15	0.01

11.5 الأجزاء الصغيرة للدمى (الألعاب)

Small Components for Toys

في هذه الحالة التطبيقية، ندرس الأجزاء الصغيرة على سبيل المثال، العجلات Wheels في نموذج دمية (لعبة) السيارة الصغيرة Toy Car المستخدم من قبل الطفل الصغير. إن الوظائف المطلوبة من هذه العجلات، أن تكون أمينة Safe، وتدور على محاورها axles. وعليه، المواد المطلوبة يجب أن تكون غير سامّة Non-Toxic Materials، لها متانة مقبولة، لاتتشوه بسهولة بواسطة الضربات أو الصدمات Knocks، غير هشّة، ومنخفضة الكلفة. وقبل أن ندرس

المواد المكنة لابد من الرجوع الى النظام البريطاني القياسي British Standard (BS5665). حيث أنه يحدد في الجزء الأول Part-1 المادة، التركيب، شروط التصميم، للدمى أو الألعاب، طرق الإختبار لبعض الخواص، شروط التعبئة Packaging والتسويق Marketing. الجزء الثاني Part-2، يحدد المواد القابلة للإشتعال والتي يجب أن لاتستخدم في تصنيع الدمى. الجزء الثالث Part-3، يحدد الشروط وطرق الإختبار لهجرة أو إنتقال Migration العناصر التالية من مواد الدمية Toy Materials : (الأنتيمون Antimony، الزرنيخ Arsenic، الباريوم Barium، الكادميوم Cadmium، الكروم Chromium، الرصاص Lead، الزئبق Mercury، والسلينيوم Selenium).

إن المنتجات المطلوبة يجب أن تكون منخفضة الكلفة عندما يتم إنتاجها بكميات كبيرة نسبياً كما أن المنتجات نفسها يجب أن تكون صغيرة جداً. ففي حالة المعادن، الطريقة الممكنة هي السباكة في القوالب المعدنية Die-Casting. وعلى الرغم من أن الكلفة الأولية لتصنيع القالب تكون عالية إلا أن العدد الكبير من الأجزاء يمكن إنتاجها من هذا القالب الواحد، وعليه، الكلفة لكل جزء Cost Per Component تصبح منخفضة نسبياً.

أما في حالة البوليمرات، فإن الطريقة الممكنة، هي القولبة بالحقن Injection Moulding. وهذه الطريقة أيضاً، تكون فيها كلفة القالب عالية إلا أن العدد الكبير من الأجزاء يمكن إنتاجها من قالب واحد فقط. وبالتالي، الكلفة لكل جزء يمكن أن تكون منخفضة. وكلا الطريقتين تبدي إنهاء سطحي جيد Good Surface Finish، ودقة بعدية جيدة Good Dimensional Accuracy. وبالنسبة للمعادن، فإن إستخدام طريقة السباكة بالقوالب المعدنية سوف يحد من عملية الإختيار حيث يكون الإختيار مقتصراً على المعادن التي تتميز بدرجة إنصهار

منخفضة نسبياً مثل الألمنيوم، المغنيسيوم، الخارصين، والقصدير. الجدول 195. يبين بعض خواص هذه المواد.

Alloy	Density (Mg/m^3)	Melting Point (^{o}C)	Strength (Mpa)
Aluminium	2.7	600	150
Lead	11.3	320	20
Magnesium	1.8	520	150
Tin	7.3	230	12
Zinc	6.7	380	280

إن إعتبارات السلامة، تؤدي عادة الى إستبعاد الرصاص Lead. إن الألمنيوم، المغنيسيوم، الخارصين تكون متقاربة من حيث الكلفة، على الرغم من أن الخارصين يتميز بالكلفة المنخفضة لكل وحدة وزن Cost Per Unit Weight. بينما يتميز القصدير بكلفة أعلى من هذه السبائك. إن الخارصين له درجة إنصهار أقل من الألمنيوم أو المغنيسيوم كما أنه في الحالة المسبوكة As-Cast يتميز بمقاومة شد أعلى. وعليه، يبدو أن الخارصين أفضل إختيار بالنسبة لهذا المنتج. إن الخارصين يستخدم بشكل واسع في حالة السباكة بالقوالب المعدنية. إن درجة إنصهاره المنخفضة وسيولته Fluidity العالية يجعله من أسهل المعادن سباكةً . حيث يمكن الحصول على الأجزاء الصغيرة ذات الأشكال المعقدة والمقاطع الرقيقة الجدران. إن سبائك الخارصين Zinc-Alloys، تتميز بخواص ميكانيكية جيدة نسبياً ويمكن طلائها كهربائياً.

أما البوليمرات، فإنها البديل الممكن للمعادن. إن طريقة التشكيل التي يمكن إستخدامها في الحصول على كميات كبيرة من هذه الأجزاء هي القولبة بالحقن Injection Moulding. إن المواد المستخدمة تكون عادة مقتصرة على المواد اللدائنية اللدنة حرارياً Thermoplastic. وعليه، يقع الإختيار على البوليمرات التي تكون جسوءة نسبياً. الجدول 20.5 يبين خواص البوليمرات مقارنةً مع خواص سبائك الخارصين.

Material	Relative Cost/m^3	Density (Mg/m3)	Strength (Mpa)	Modulus (Gpa)	Cost/Unit Strength	Cost/Unit Stiffness
ABS	1	1.02-1.07	50	2.3	0.02	0.43
Nylon 6	2	1.13-1.14	60	3.2	0.033	0.63
Polycarbonate	2	1.2	65	2.3	0.031	0.87
Zinc alloy	3	6.7	280	103	0.011	0.03

Material	Endurance Limit for 10^7 Cycles (Mpa)	Creep Modulus at 100h Gpa	Notched Impact Strength (KJ/m^2)	Cost/Unit Fatigue Strength	Cost/Unit Creep Strength	Cost/Unit Impact Strength
ABS	15	1.5	7	0.07	0.67	0.14
Nylon 6	14	0.5	3	0.14	4	0.67
Polycarbonate	7	1.6	30	0.29	1.3	0.07
Zinc alloy	65	51	55	0.05	0.06	0.05

الجدول 20.5 مقار نة سبائك الخارصين واللدائن اللدنة حرارياً عند C ْ20.

إن الخواص الميكانيكية للخارصين هي أفضل من من تلك الخواص للدائن اللدنة حرارياً. حيث يتميز بمقاومة أعلى، ومعامل شد أعلى، متانة أفضل، ومقاومة كلال و زحف أعلى. ومن ناحية أخرى، حيث يكون الوزن الخفيف من الشروط المطلوبة، تتميز البوليمرات بوزنها الخفيف مقارنة مع سبائك الخارصين حيث تكون كثافتها حوالي (1/6) من كثافة الخارصين. أضف الى ذلك، أن السطوح الملونة تكون مطلوبة في هذه المنتجات، وهنا، أيضاً تتميز البوليمرات على سبائك الخارصين، لأن الأصباغ Pigments يمكن إستخدامها مع مزيج البوليمر Polymer-Mix. أما إذا كان، الطلاء الكهربائي Electroplating مطلوباً ففي هذه الحالة تتميز سبائك الخارصين على البوليمرات. وعلى أساس، الكلفة لكل وحدة وزن Cost per Unit weight، يكون الخارصين أقل كلفة، ولكن ربما يكون المهم، الكلفة لكل وحدة حجم Cost Per Unit Volume. الجدول 20.5 يبين قيم الكلفة لكل وحدة خاصية Cost Per Unit Property. وعلى أساس جميع الإعتبارات، يعتبر الخارصين المادة الأقل كلفة، على الرغم من أن الكلفة لكل وحدة مقاومة كلال Cost Per Unit Fatigue Strength والكلفة لكل وحدة مقاومة صدمة Cost Per Unit Impact Strength

تكون متقاربة مع بعض البوليمرات. وعلى أساس الإعتبارات أعلاه، يعتبر الخارصين المادة المثلى Optimum Material. وفي الحالات التي يكون فيها المطلوب الحصول على سطح ملون تستخدم عادة البوليمرات وفي أغلب الأحيان يتم إستخدام مادة ABS.

المسائل Problems

1. حدّد نوع المادة التي عندما تستخدم كغشاء Diaphragm سوف تبدي أقصى قيمة من الإنحراف Deflection أو الإنحناء مقابل الضغط المختلف عبر الغشاء، إذا كان لدينا المواد التالية: الزجاج Glasses، فولاذ النابض Spring، النايلون Nylon، والمطاط Rubber.

2. حدّد نوع المادة التي سوف تبدي أدنى كمية من التشوه الحراري عندما تخضع الى تغيرات في درجات الحرارة. نفرض أن لدينا المواد التالية: الألمنيوم، النحاس، الماس Diamond، وكاربيد السيلكون Silicon Carbide .

3. حدّد أسباب إختيارك لمواد المنتجات التالية :

أ. سقّاطة (مزلاج) النوافذ المنزلية Domestic Window Catches.

ب. العتبات الإنشائية بشكل حرف I-Beam المستخدمة في تركيبة البناء – Building Construction.

ج. أخاديد أو مجراة تصريف ماء المطر Rainwater Gutter وأنابيب التفريغ Down Pipes.

د. صحن الغسل المنزلي Domestic Washing-Up Bowl.

هـ. الأنبوب الذي يمكن من خلاله ضخ ماء البحر Sea Water.

و. ريش Blades المروحة الصغيرة Fan المستخدمة في المكنسة الكهربائية Vacuum Cleaner.

ز. عدسات Lenses المصابيح الخلفية Rear Lights في السيارة.

ح. عمود إدراة الكامات Camshaft.

4. ماهي المواد المستخدمة في المنتجات التالية، وضّح أسباب تفضيلك إختيار تلك المواد على غيرها:

أ. غطاء Casing القابس (مأخذ كهربائي تتصل شعبتاه بالمقبس) Plug الكهربائي.

ب. مجراف الحدائق Gardening Spades.

ج. أنابيب الماء البارد والساخن المنزلية.

د. غطاء هيكل المكنسة الكهربائية Vacuum Cleaner.

5. عمود منشفة Towel Rail مكون من أنبوب Tube أو قضيب Rod مثبت بواسطة ملزمة Clamp عند طرفيه على الجدار. إن عمود المنشفة يستخدم عادة في الجو البخاري Steamy Atmosphere للحمام Bathroom . فإذا كان المطلوب الحصول على قضبان المنشفة بشكل إنتاج جملي Mass Production، وان تكون كلفتها منخفضة، وتقاوم وزن المناشف الرطبة Wet Towel من دون حدوث أي إنحناء دائمي Permanent Bent تحت تأثير هذه الأحمال:

أ. ماهي الخواص التي تحدد المادة التي يمكن أن تستخدم.

ب. إقترح المواد الممكنة.

ج. ما الذي يحدد إستخدام الأنبوب Tube أو القضيب Rod ؟ ما الذي يحدد سمك الأنبوب وقطره أو قطر القضيب.

د. ماهي العوامل التي تؤثر على كلفة المنتج النهائي.

6. لو فرضنا أن مفاتيح اربط Spanners مطلوب إنتاجها بشكل جملي، وبيعها بكلفة منخفضة، وأن المادة المستخدمة في تصنيعها يجب أن تكون منخفضة الكلفة ولكنها في نفس الوقت تقاوم الإستخدامات التي سوف يتم إستخدام هذه المفاتيح فيها:

أ. ماهي الخواص التي تحدد نوع المادة التي يمكن إستخدامها؟

ب. ماهي طرق المعالجة المطلوبة، آخذين بنظر الإعتبار أن المنتج منخفض الكلفة؟

ج. حدّد المادة الممكنة وطريقة المعالجة أو التصنيع المناسبة.

7.

أ. ماهي خواص المادة المستخدمة في خطوط سكك الحديد Railway Lines.

ب. ماهي المادة التي يمكن أن تكون ملائمة لخطوط سكك الحديد.

ج. ماهي الطريقة التي يمكن أن تستخدم في إنتاج خطوط سكك الحديد.

د. في بريطانيا تستخدم عادة خطوط سكك الحديد المستمرة Continuous Railway، ماهي الطرق المستخدمة في لحام أو ربط هذه الخطوط للحصول على هذه الأطوال الطويلة من خطوط تلك المادة.

8. ماهي الخواص المطلوبة للمادة التي تستخدم في أنظمة العادم Exhaust System؟ ماهي المادة التي يمكن أن تكون مناسبة لأنظمة العادم؟

9. إن المواد التالية قد أستخدمت للمنتجات المشار إليها. ماهي الخواص التي تجعل هذه المواد مناسبة لهذه المنتجات :

أ. الخلية المغلقة لرغوة البولي يرثين Closed Cell Polyethylene المستخدمة في تصنيع جلد نعل الحذاء Shoe Sole Skin.

ب. البولي أثيلين المنخفض الكلفة Low Density Polyethylene المستخدم كغطاء للسلك الكهربائي Electric Wire Covering.

ج. ABS المستخدم في التلفون اليدوي المدمج Telephone Handsets.

هـ. سبيكة الألمنيوم –نحاس (10% المسبوكة (LM12, AA222.0)) المستخدمة في المكابس Pistons.

و. حديد الزهر الرمادي Grey Cast Iron المستخدم في أغطية فتحة الدخول (المستخدمة في المجاري) Manhole Covers.

ز. الفولاذ الحاوي على الكروم Chromium Steel (530M40, AISI:0.4%C,0.75%Mn, 1.05%Cr) المستخدم في عمود المرفق Crankshafts.

ح. الفولاذ المقاوم للصدأ المارتنسايتي Martinsitic Stainless Steel (403, 420S29: 0.15%C, 12.2%Cr, 1%Mn) المستخدم في ريش التوربين البخاري Steam Turbine Blades.

ط. برونز الفسفور Phosphor Bronze (Pb103:7%Sn) المستخدم في المشبك النابضي Spring Clips.

ك. سبيكة المغنيسيوم- ألمنيوم - خارصين Mg-Al-Zn (MAG1,AZ81A:7.6%Al, 0.7%Zn, 0.2%Mn المسبوكة المستخدمة في صناديق العدة الكهربائية المحمولة Portable Electric Tool Cases.

ل. سبيكة النيكل-كروم-حديد Ni-Cr-Fe (Nimonic 80A) المستخدمة في قلب Core وليجة Inserts القالب المعدني Die-Casting.

10. كيف يمكنك إجراء تحليل الإستحقاق Merit Analysis بإختيار الخواص المناسبة وعوامل التعديل الترجيحي Weighting Factors، للقنينة اللدائنية Plastic Bottle المستخدمة في المشروب الساكن Still Drink (الذي لا يصدر أزيزاً Fizz:) بإستخدام المواد التالية:

Low Density Polyethylene (LDP).

PVC.

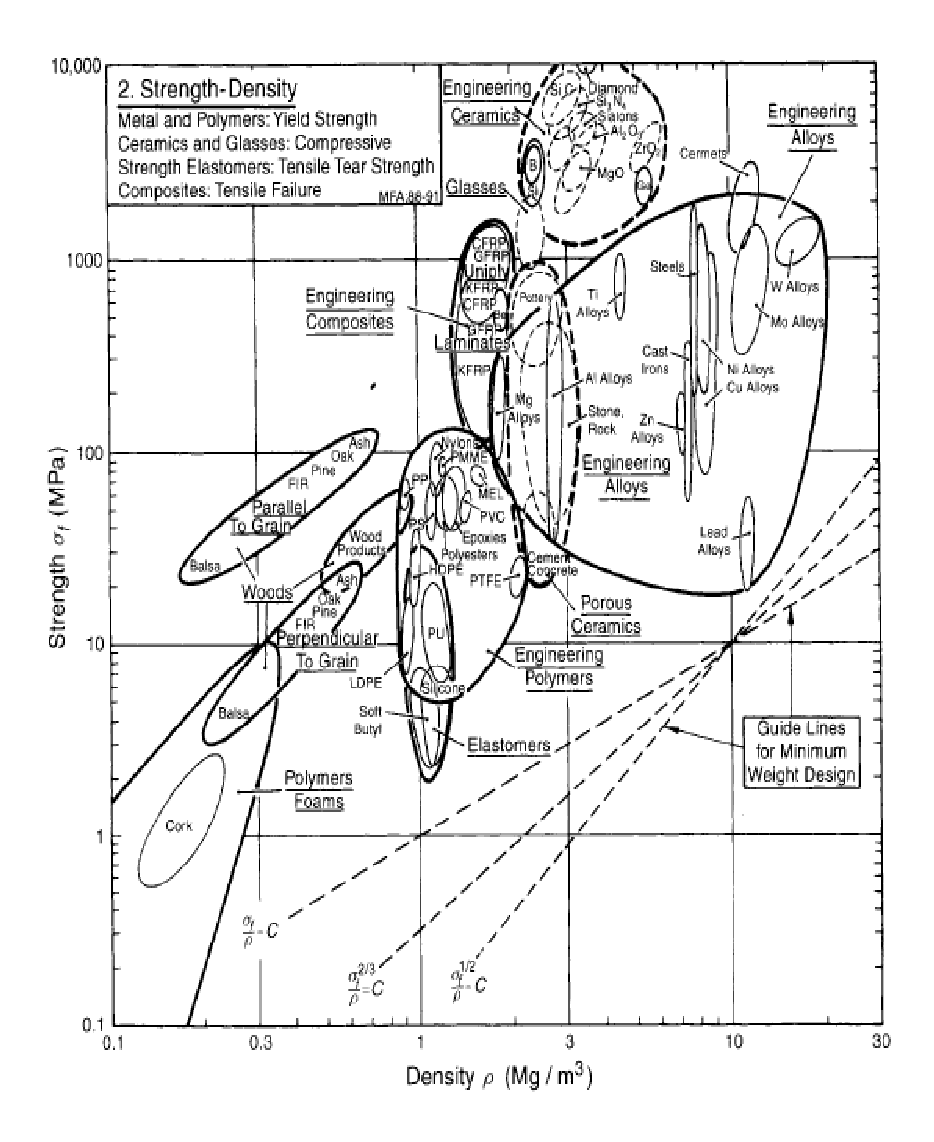
Polyethylene Terephthalate.

(انظر المقطع 5.6.)

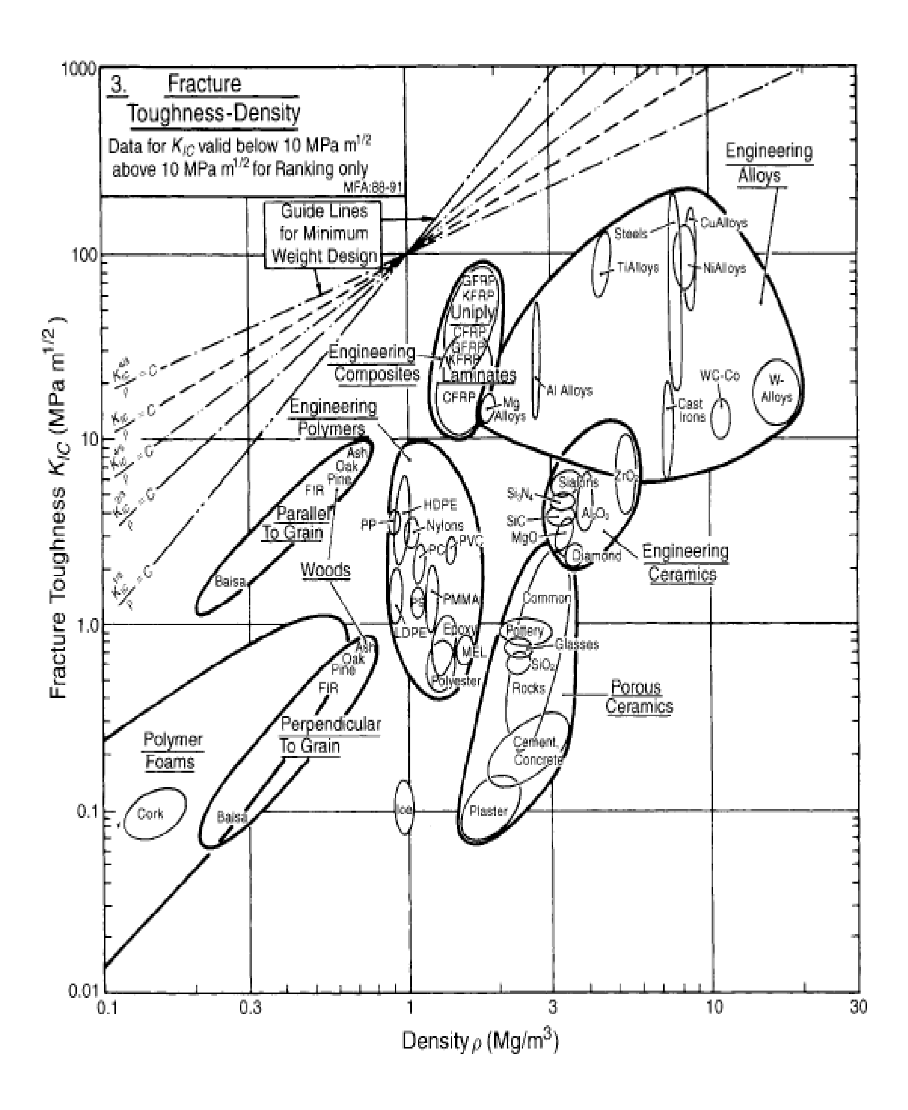
الملاحـــق

مخططات إختيار المواد الهندسية
Material Selection Charts

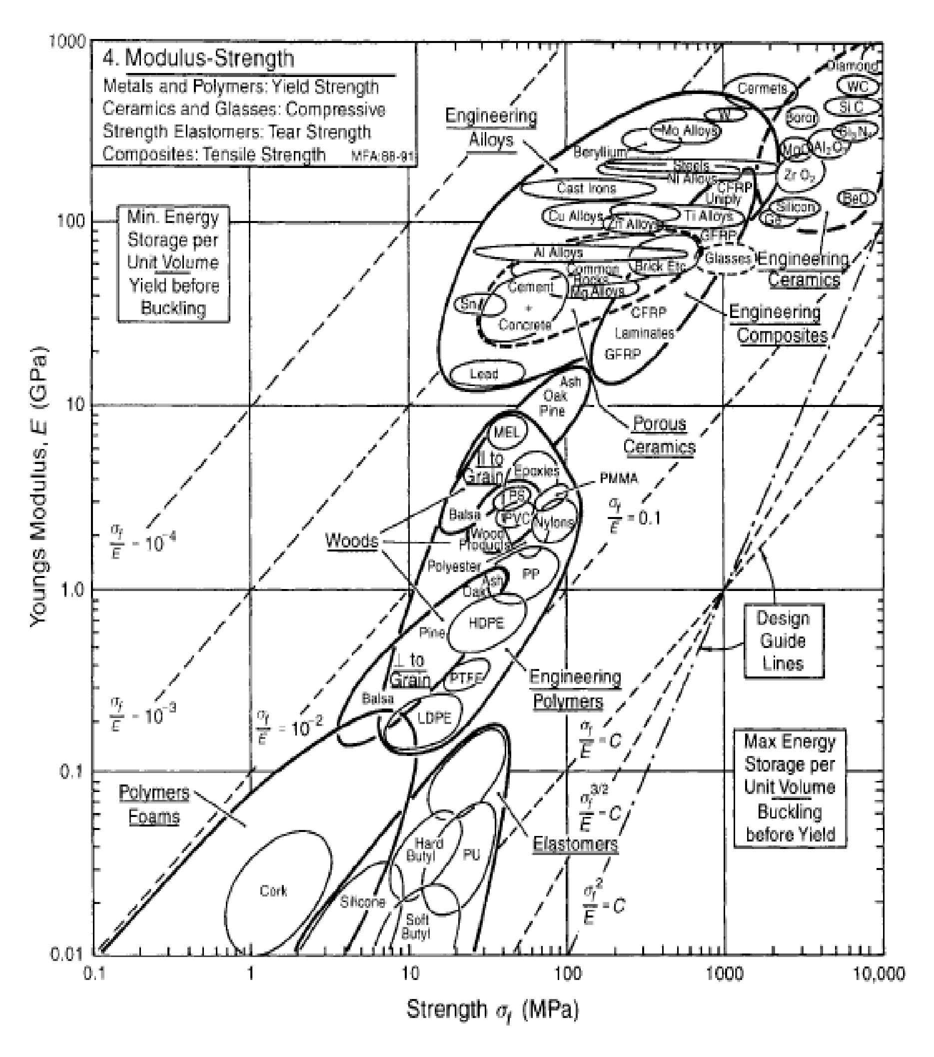
إن الخواص الهندسية للمواد تكون عادة ذات جدوى عند إظهارها بشكل مخططات إختيار المادة Material Selection Charts كما مبين في الأشكال (A1-A14). إن هذه المخططات تلخص المعلومات بشكل موجز، و بإسلوب يسهل الوصول إليها. أضف الى ذلك، أنها تبين المدى لأي خاصية معينة بحيث يسهل الوصول إليه من قبل المصمم و تحديد صنف المادة المرتبط مع أجزاء ذلك المدى. إن العامل المهم في هذه المخططات يتضمن الإسلوب الذي يتجمع فيه صنف معين من المواد معاً. فعلى الرغم من المدى الواسع لمعامل المرونة Modulus of Elasticity والكثافة Density للمعادن على سبيل المثال، فإنها تشغل مجالاً معيناً في المخطط يميزها عن المواد البوليمرية، المواد السيراميكية، و المواد المركبة. و هذا ينطبق أيضاً على المقاومة Strength، المتانة Toughness ، الموصلية الحرارية Thermal Conductivity ، على الرغم من تداخل بعض المجالات في بعض الحالات.



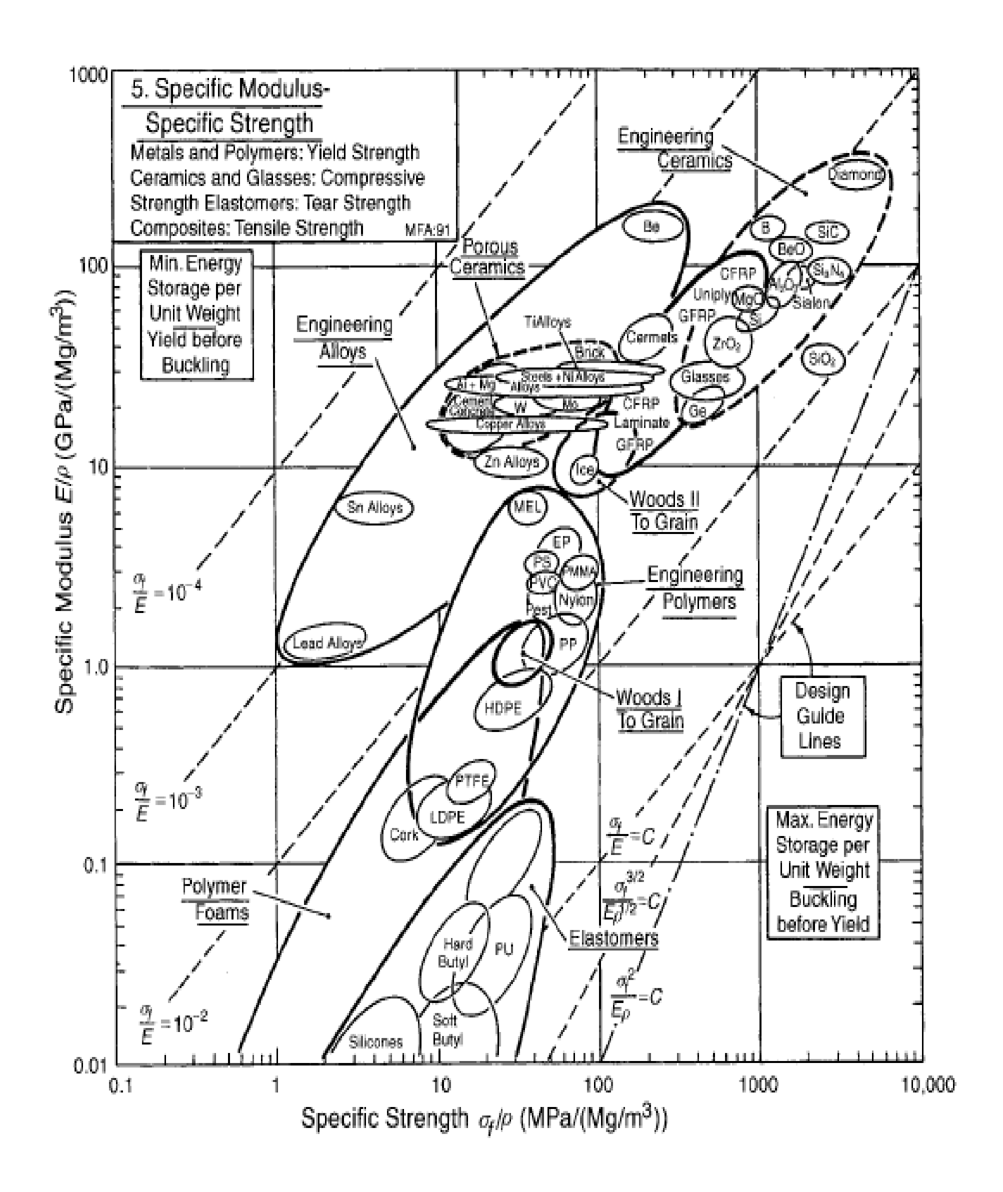
الشكل A.1 مخطط اختيار المواد (علاقة الكثافة مع المقاومة).



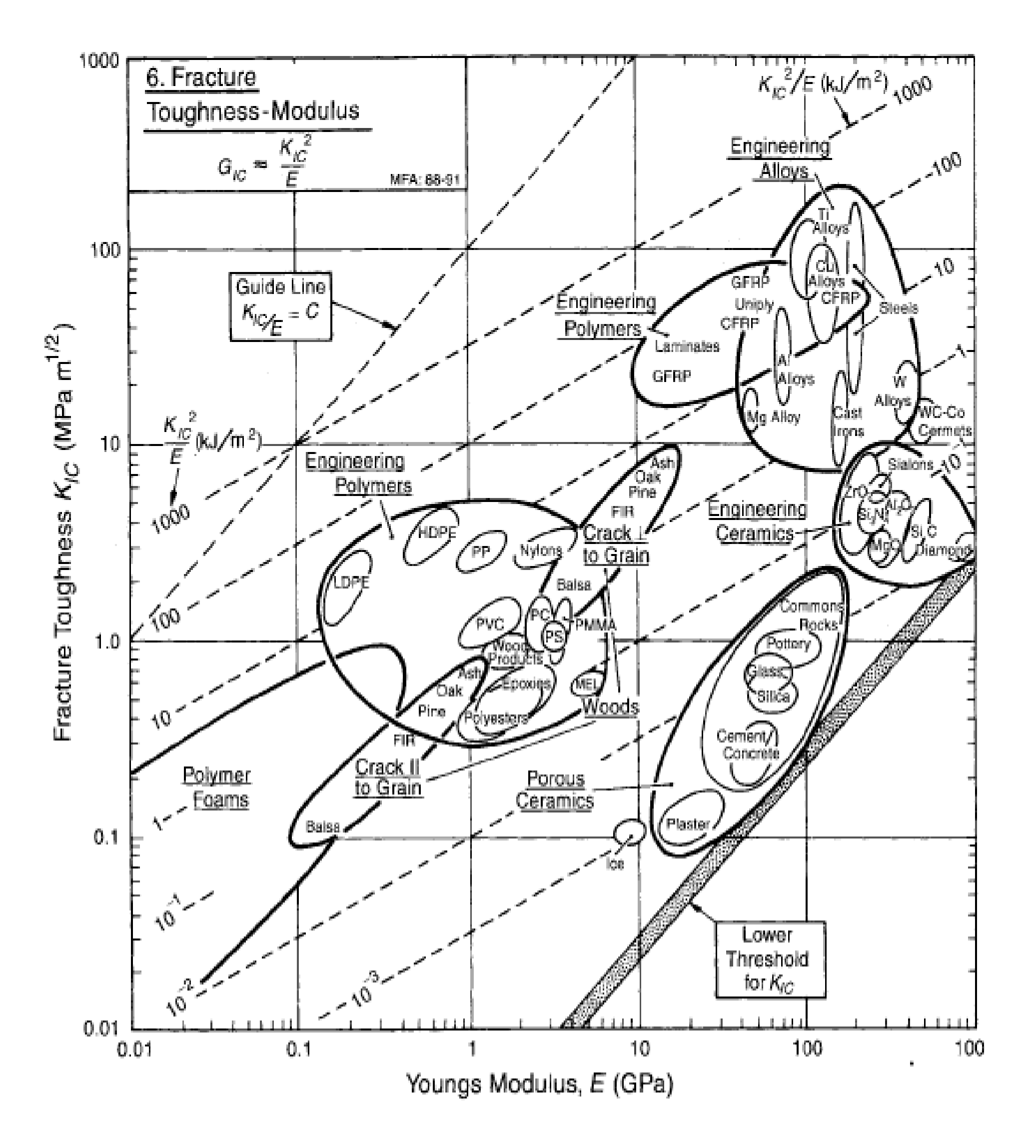
الشكل A.2 مخطط اختيار المواد (علاقة الكثافة مع متانة الكسر).



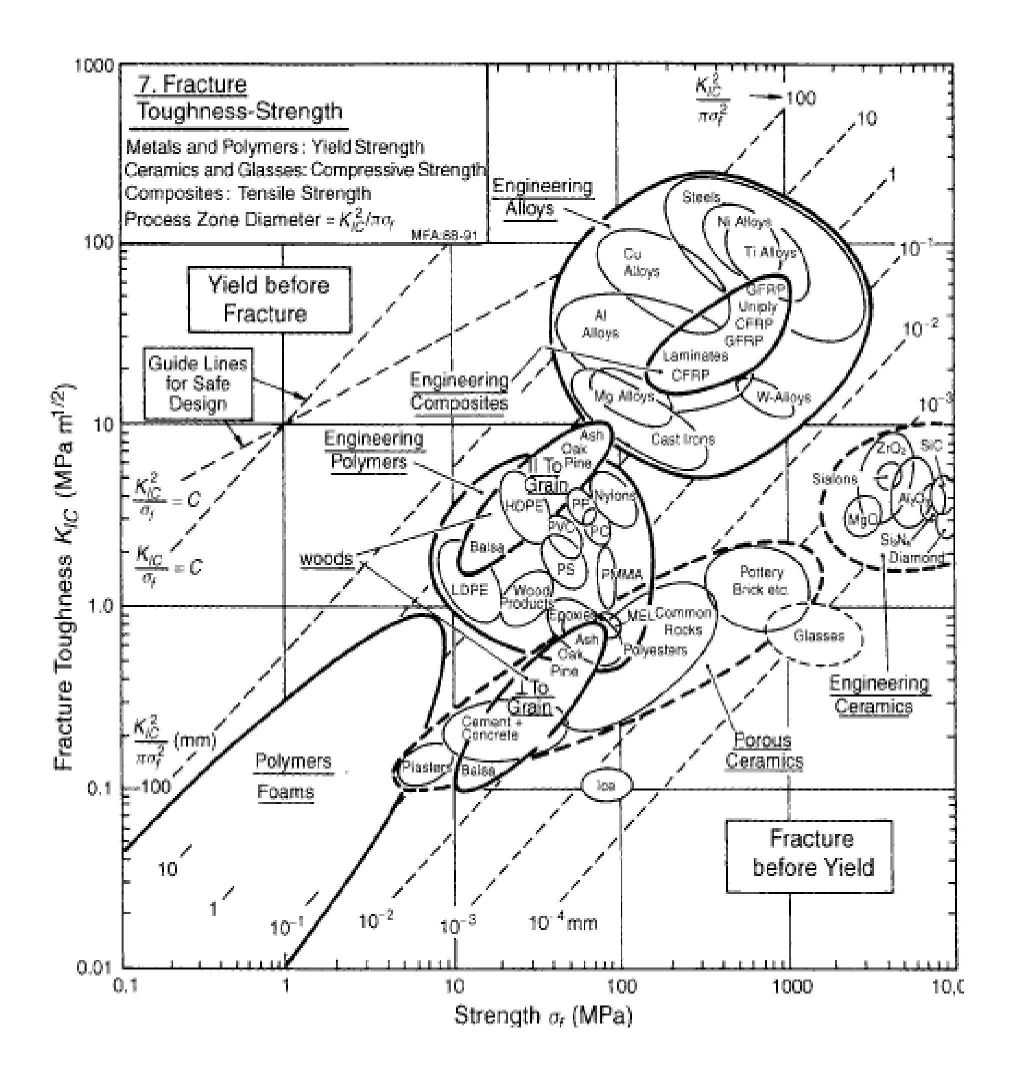
الشكل A.3 مخطط اختيار المواد (علاقة المقاومة مع معامل المرونة).



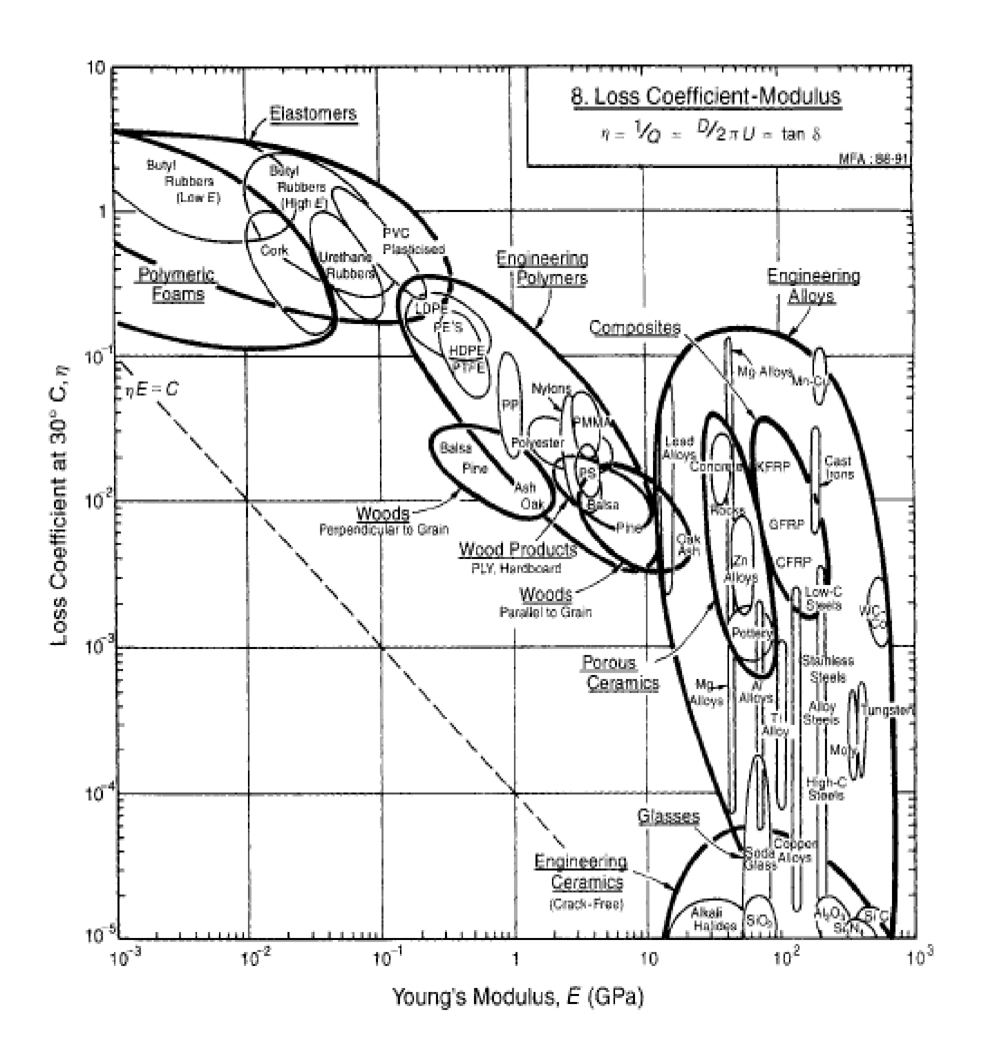
الشكل A.4 مخطط اختيار المواد (علاقة المقاومة النوعية مع المعامل النوعي).



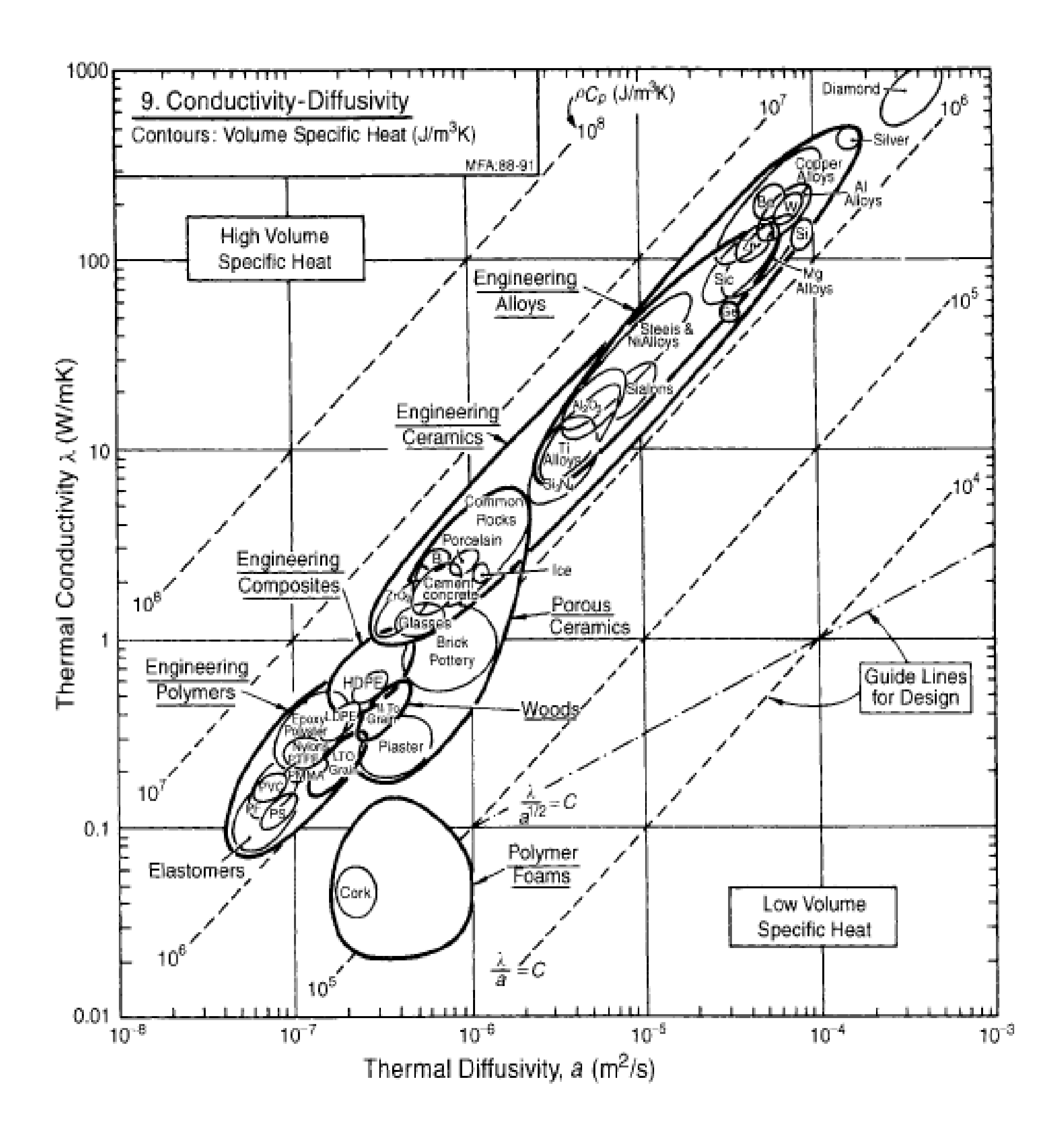
الشكل A.5 مخطط اختيار المواد (علاقة معامل المرونة مع متانة الكسر).



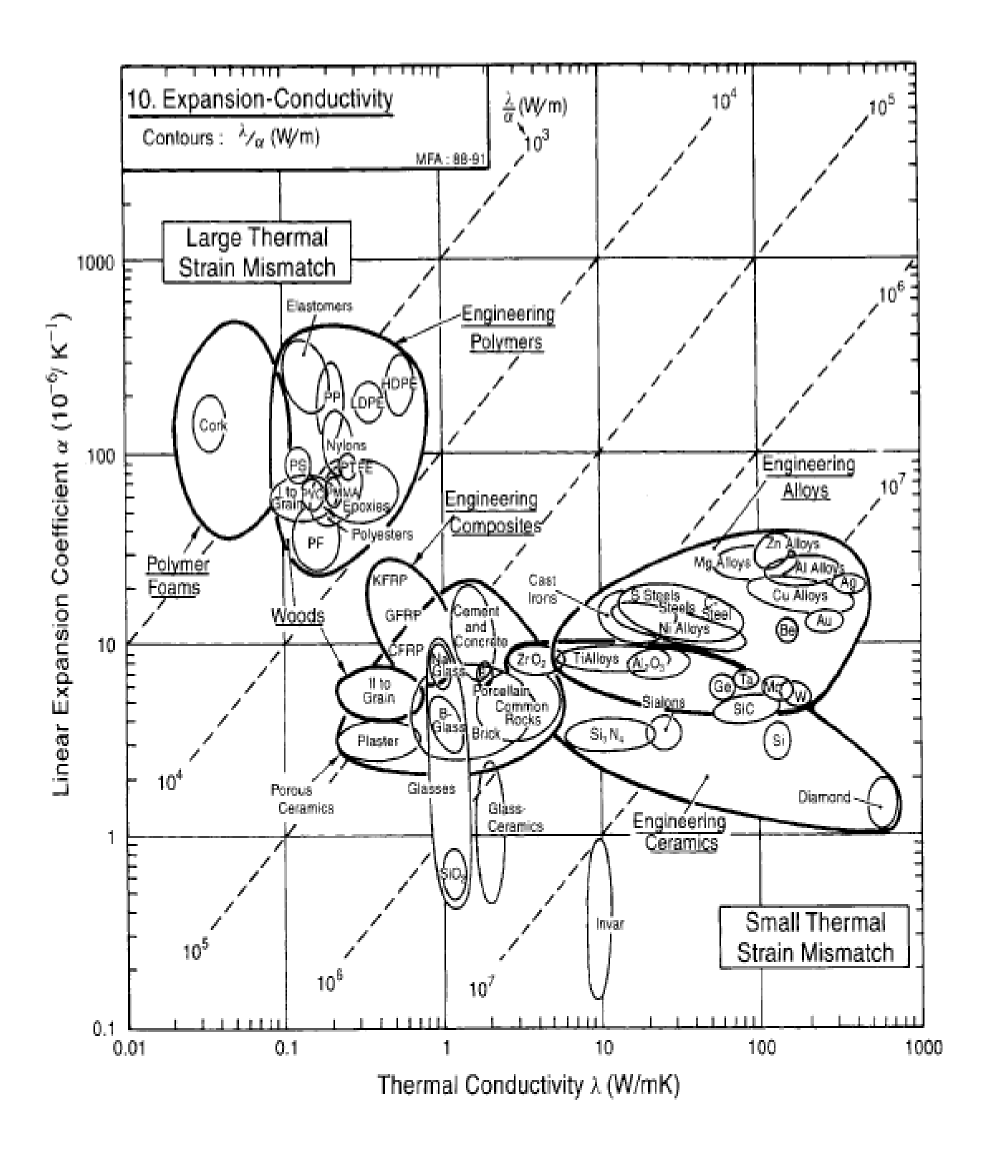
الشكل A.6 مخطط اختيار المواد (علاقة المقاومة مع متانة الكسر).



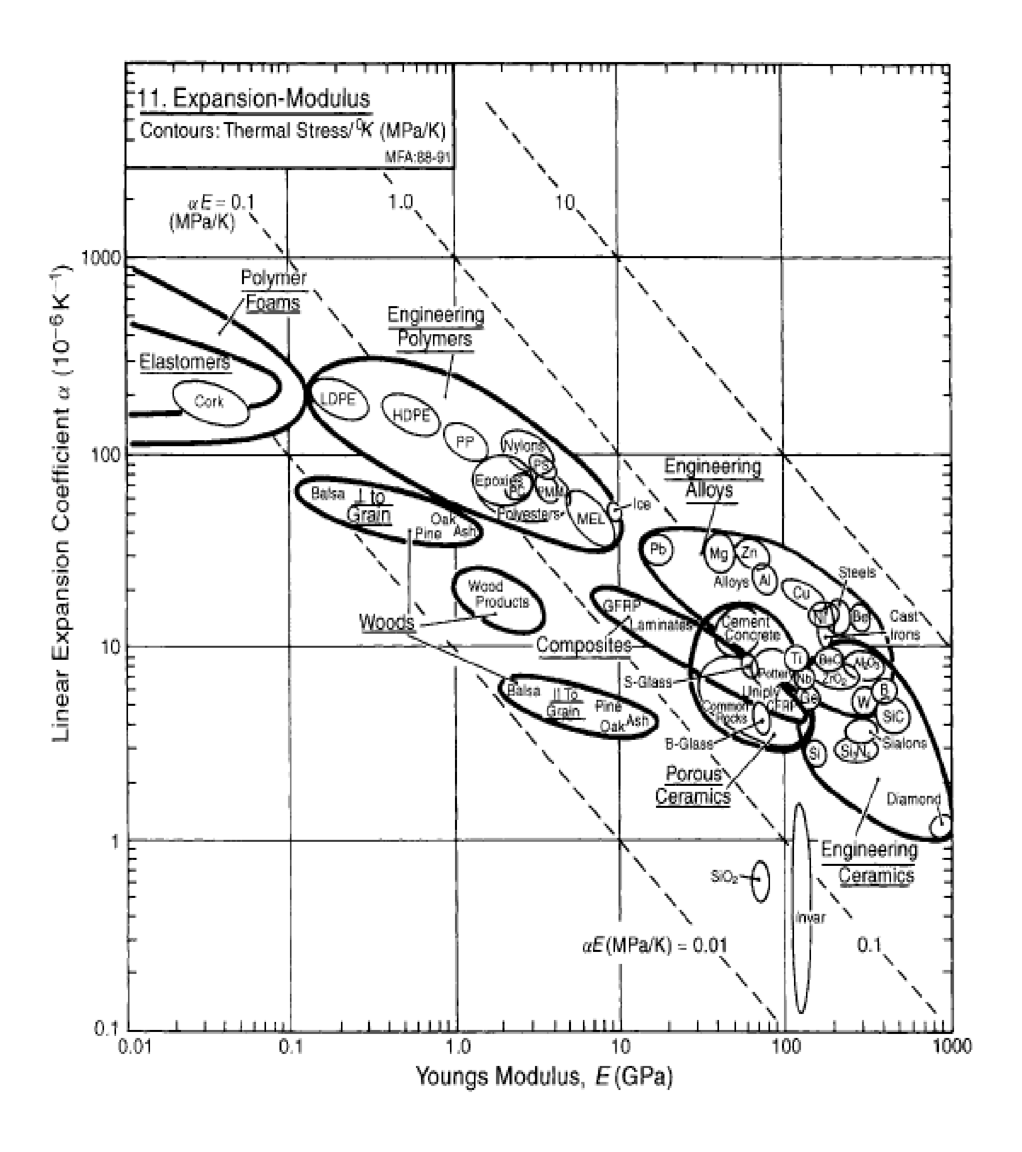
الشكل A.7 مخطط اختيار المواد (علاقة معامل المرونة مع معامل الفقدان).



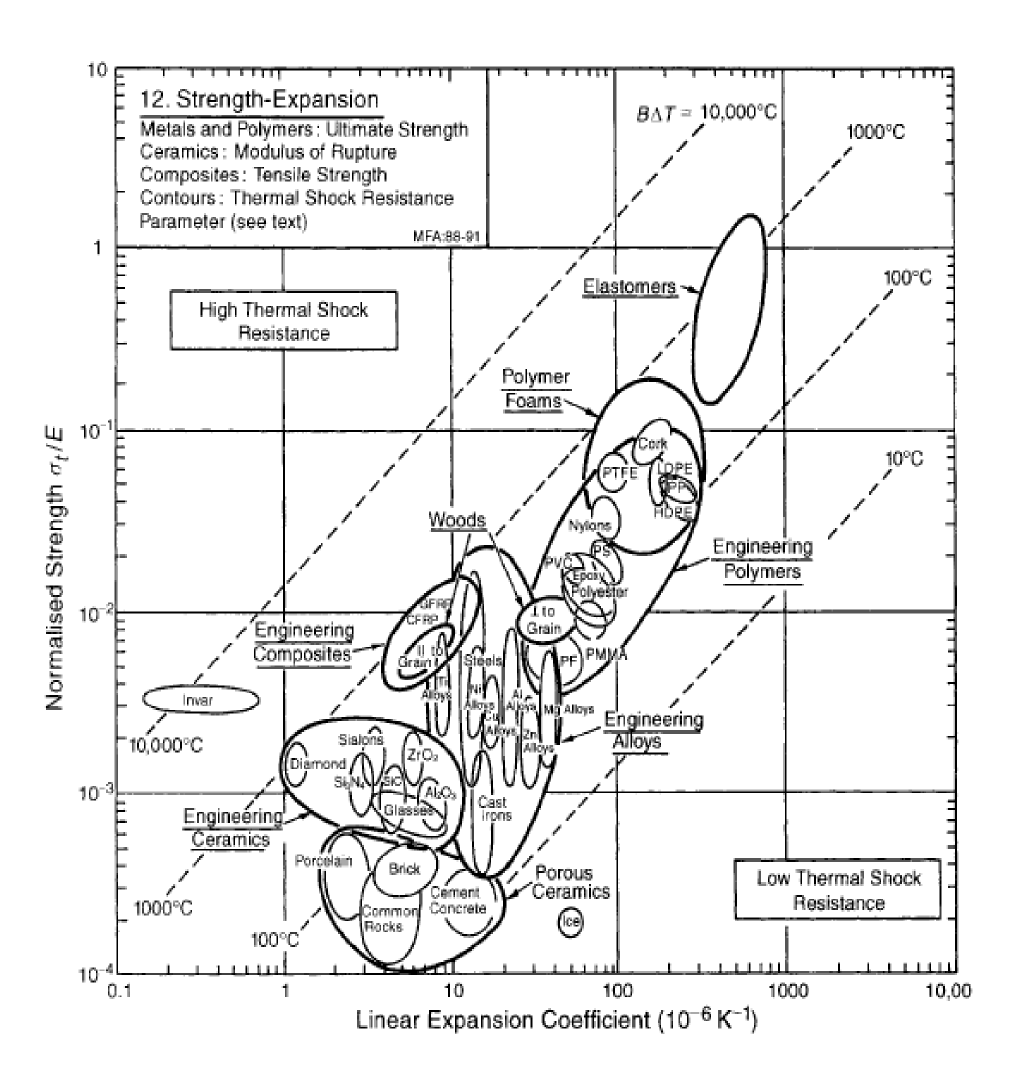
الشكل A.8 مخطط اختيار المواد (علاقة الإنتشارية الحرارية مع الموصلية الحرارية).



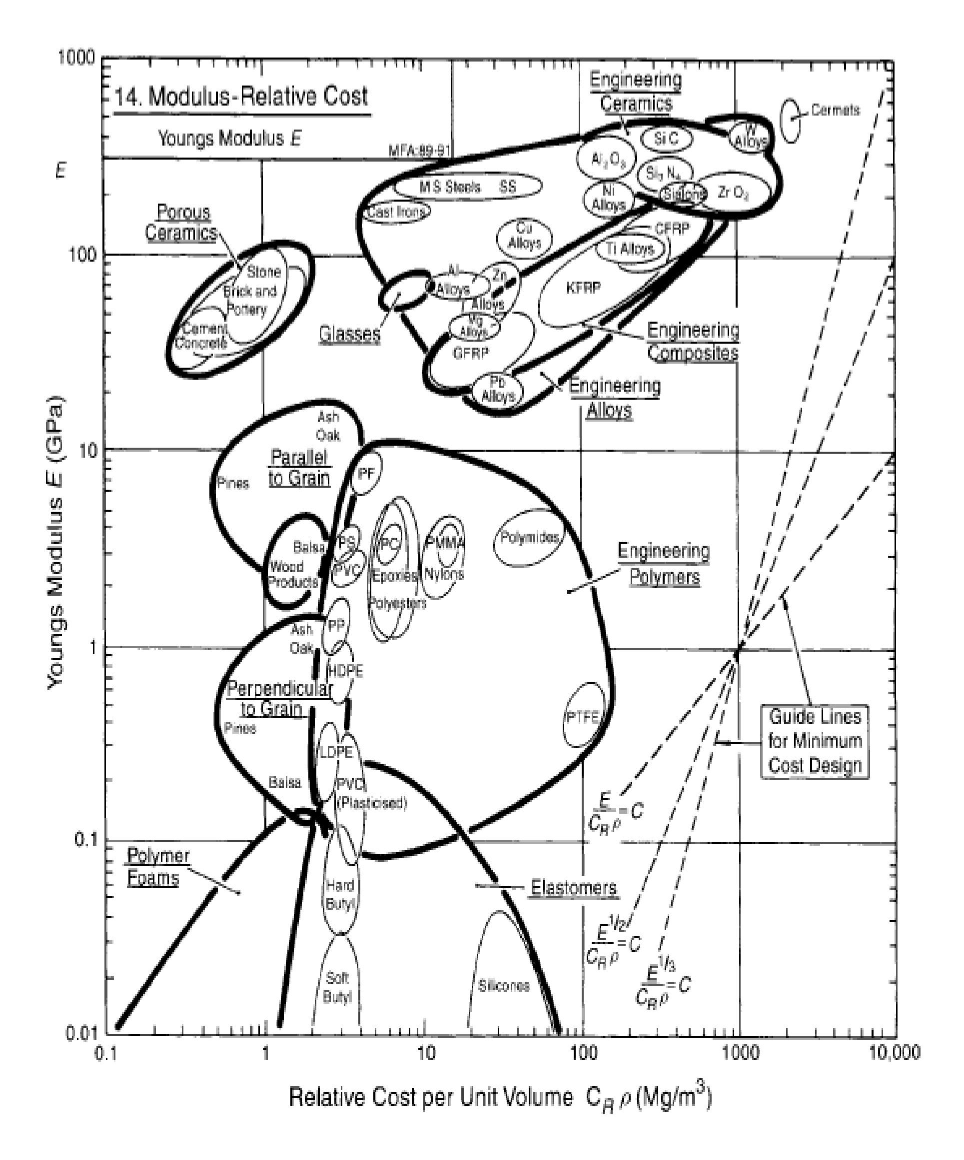
الشكل A.9 مخطط اختيار المواد (علاقة الموصلية الحرارية مع معامل).



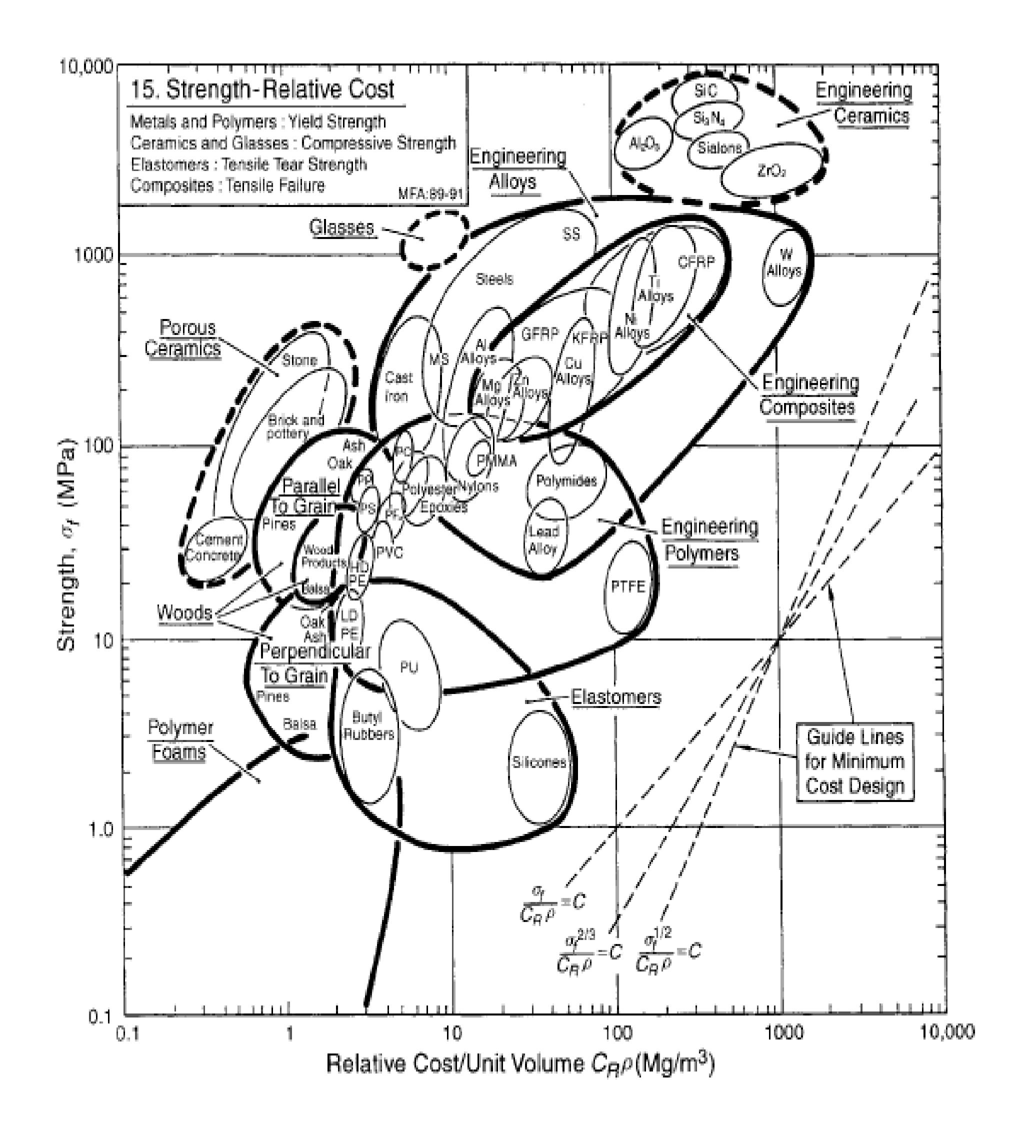
الشكل A.10 مخطط اختيار المواد (علاقة المرونة مع معامل التمدد الحراري الخط).



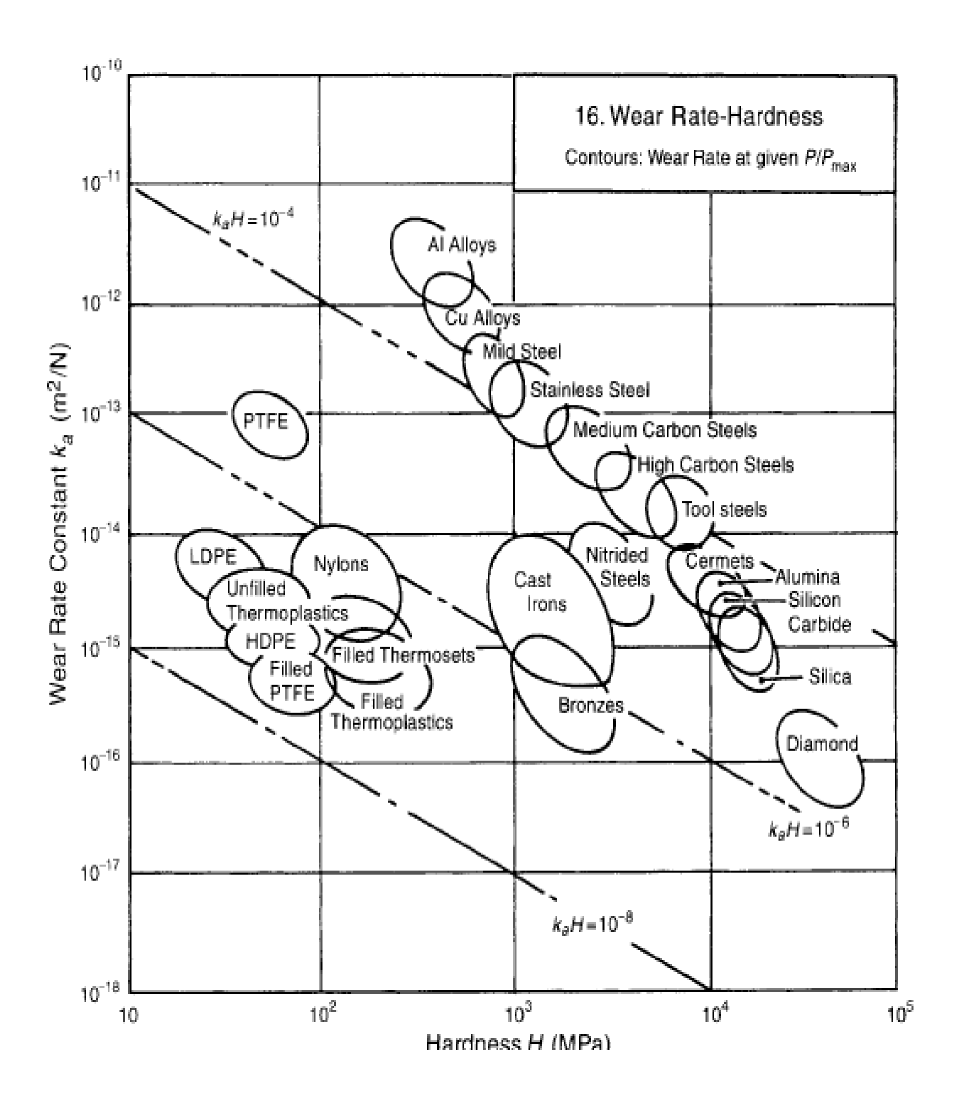
الشكل A.11 مخطط اختيار المواد (علاقة معامل التمدد الخطي مع المقاومة المعادلة).



الشكل A.12 مخطط اختيار المواد (علاقة الكلفة النسبية لكل وحدة حجم مع معامل المرونة).



الشكل A.13 مخطط اختيار المواد (علاقة الكلفة النسبية لكل وحدة حجم مع المقاومة).



الشكل A.14 مخطط اختيار المواد (علاقة الصلادة مع ثابت معدل البلى).

المراجـــع

References

1. Donald R.Askland, Pradeep, " The Science and Engineering of Materials", Thomoson, 2006.
2. M.Philip, W.Bolton, " Technology of Engineering Materials", Butterworth, Heine Mann,2002.
3. Jems P.Schaffer , Ashok Saxena, Stephem D.Antolovich, Thomas H.Sanders, Jr. Steren B.Warner, IRWIN, INC, 1995.
4. Michael F.Ashby, "Materials Selection in Mechanical Design", Butterworth, Heine Mann, 2000.
5. D.F.Baddly, J.A.Cannon, "Progressive Engineering Materials", Hodder and Stoughton London Sydney Auckland Toroto, 1988.
6. Mahmoud M.Farage , "Materials and Process Selection in Engineering" , Applied Science Publishers LTD, London, 1979.
7. William D.Callister, Jr. , "Materials Science and Engineering, An Introduction", John Wiley & Sons, Inc. 2007.